



**TUGAS AKHIR - TE141599**

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENETRASI  
DAYA BESAR DARI SUMBER ENERGI TERBARUKAN**

Masluchi Aidil Fais  
NRP 2213105048

Dosen Pembimbing  
Dr. Rony Seto Wibowo, S.T.,M.T  
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**FINAL PROJECT - TE141599**

**DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW WITH LARGE  
PENETRATION OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES**

Masluchi Aidil Fais  
NRP 2213105048

Supervisor  
Dr. Rony Seto Wibowo, S.T.,M.T  
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENETRASI  
DAYA BESAR DARI SUMBER ENERGI TERBARUKAN**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui**

**Dosen Pembimbing I**



**Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.**  
NIP. 197411292000121001

**Dosen Pembimbing II**



**Dr. Ir. Soedibyo, M.M.T.**  
NIP. 195512071980031004



# **Aliran Daya Optimal Dinamis Dengan Penetrasi Daya Besar Dari Sumber Energi Terbarukan**

Masluchi Aidil Fais  
2213 105 048

Dosen Pembimbing I : Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T  
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

## **Abstrak:**

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan salah satu pembangkit listrik baru terbarukan yang memanfaatkan energi angin sebagai bahan bakar. Energi angin dapat diperoleh secara gratis (tidak memerlukan biaya bahan bakar) dari alam. Sehingga daya yang dibangkitkan oleh PLTB harus diinjeksikan secara maksimal. Namun, angin memiliki sifat yang relatif berubah-ubah. Pada PLTB, kondisi angin relatif besar pada saat beban tidak puncak (*off peak load*) dan relatif kecil pada saat beban puncak (*on peak load*). Untuk mengatasi hal ini, dapat digunakan *Energy Storage System* (ESS). ESS dipasang dan diintegrasikan dengan sistem untuk menyimpan daya yang tak terpakai pada saat beban tidak puncak (*charging*) dan akan disalurkan kembali (*discharging*) ke saluran sistem saat beban puncak. Akan tetapi, daya yang disalurkan melalui kedua proses tersebut masih belum tentu optimal seiring dengan perubahan beban setiap saat. Oleh karena itu, diperlukan analisis aliran daya optimal dinamis atau *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) dengan menggunakan metode *Sequential Quadratic Programming* (SQP). Dari hasil simulasi pada sistem IEEE 14 bus modifikasi menunjukkan bahwa SQP dapat digunakan untuk menyelesaikan DOPF tanpa melanggar parameter *ramp rate* yang sudah ditentukan. Selain itu, energi yang disimpan pada ESS memiliki nilai yang sama besar dengan energi yang dikeluarkan dari ESS. Sehingga total biaya pembangkitan dengan menggunakan ESS lebih murah dibandingkan tanpa menggunakan ESS.

**Kata kunci:** *ramp rate, ESS, dynamic optimal power flow, sequential quadratic programming.*

*-- Halaman ini sengaja dikosongkan --*

# ***Dynamic Optimal Power Flow With Large Penetration of Renewable Energy Resources***

Masluchi Aidil Fais  
2213 105 048

Supervisor I : Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T  
Supervisor II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

## **Abstract:**

*Wind power generation is one of renewable energy generation that using wind as a fuel . Wind energy can be obtained for free (does not require fuel cost) of nature. So that the power of wind energy should be injected to the maximum. But, the wind has characteristics that changes. At wind power, wind conditions are relatively high when off peak load and low when on peak load.. To solve it, needed Energy Storage System (ESS). ESS was installed and integrated with the system to save unused power for a few minutes (charging) and will be distributed back (discharging) to system when peak load. However, the power is distributed through these two processes is not necessarily optimal along with increased load or demand changes every times. Therefore, the dynamic optimal power flow (DOPF) analysis is required using by sequential quadratic programming (SQP) methods. From the results of the simulation have been performed on the IEEE 14 bus modified system shows that the SQP can be used to resolve DOPF without violating parameter ramp rate which is already specified. In addition, the energy charged in the ESS has a value equal to the energy in the discharge of the ESS. So, the total cost of generation using ESS is cheaper than without using ESS.*

**Keywords:** ramp rate, ESS, dynamic optimal power flow, sequential quadratic programming.

-- *Halaman ini sengaja dikosongkan* --

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul

**“Aliran Daya Optimal Dinamis Dengan Penetrasi Daya Besar Dari Sumber Energi Terbarukan”**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih atas segala bantuan dan dukungannya yang telah diberikan selama proses pembuatan Tugas Akhir ini kepada :

1. Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Kedua orang tua atas dukungan baik spiritual maupun material yang tak ternilai harganya.
3. Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T, sebagai dosen pembimbing yang telah banyak memberikan ilmu, pengarahan, dan bimbingan selama penulis mengerjakan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Soedibyo M.MT, sebagai dosen pembimbing yang telah banyak membantu dalam kelancaran mengerjakan tugas akhir ini.
5. Teman – teman di Teknik Elektro, Nani Lathifatun Nada, Annisa Taradini, Kharismawan S, Sampulur Kerta S, Rurizwan Syahruwibisana, Ainul Khakim, dan lainnya yang telah banyak memberi bantuan dan semangat serta dukungan pada penulis.
6. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan tugas akhir ini.

Surabaya, 6 Juli 2015

Penulis



*-- Halaman ini sengaja dikosongkan --*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii

### BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metode Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	5

### BAB 2 ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENETRASI DAYA BESAR DARI PLTB

2.1 Studi Aliran Daya.....	7
2.2 Aliran Daya Optimal .....	8
2.3 Persamaan Matematis OPF .....	9
2.4 Aliran Daya Optimal Dinamis .....	11
2.5 OPF Dengan Penetrasi Daya Dari Sistem PLTB .....	13
2.6 <i>Sequential Quadratic Programming</i> (SQP).....	15
2.7 Penyimpan Energi .....	17

### BAB 3 PENERAPAN *SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING* PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS

3.1 Algoritma.....	19
3.2 Program Matpower.....	20
3.3 Sintaksis <i>Sequential Quadratic Programming</i> (fmincon).....	21
3.4 Input Argumen dari SQP (fmincon).....	22
3.5 <i>Sequential Quadratic Programming</i> Pada DOPF .....	23

3.5.1 Inisialisasi Permasalahan DOPF .....	23
3.5.2 Inisialisasi $x_0$ Sebagai Nilai Awal .....	24
3.5.3 Pembentukan Fungsi Objektif $F$ dan $DF$ .....	25
3.5.4 Pembentukan Matriks $geq$ dan $dgeq$ Representasi dari Equality Constraint .....	26
3.5.5 Pembentukan Matriks $g$ dan $dg$ Representasi dari Inequality Constraint .....	28
3.5.6 Pembentukan Vektor $lb$ dan $ub$ yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari Variabel yang dioptimasi ..	30
3.5.7 Constraint Kapasitas ESS .....	32
3.5.8 Energy Balance ESS .....	32

## **BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS**

4.1 Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi .....	35
4.2 Simulasi <i>Dynamic Optimal Power Flow</i> (DOPF) Pada Sistem IEEE 14 Bus .....	37
4.2.1 Hasil Simulasi Untuk Profil Beban 1 .....	37
4.2.2 Hasil Simulasi Untuk Profil Beban 2 .....	38
4.2.3 Hasil Simulasi Untuk Profil Beban 3 .....	39
4.3 Analisis <i>Dynamic Optimal Power Flow</i> (DOPF) Pada Sistem IEEE 14 Bus .....	40
4.3.1 Analisis Untuk Profil Beban 1 .....	40
4.3.2 Analisis Untuk Profil Beban 2 .....	41
4.3.3 Analisis Untuk Profil Beban 3 .....	43
4.4 Simulasi Sistem IEEE 14 Dengan Profil Beban Dinamis .....	44
4.4.1 Simulasi <i>Study Case 1</i> .....	45
4.4.1.1 Hasil Simulasi Tanpa Menggunakan ESS .....	45
4.4.1.2 Hasil Simulasi Dengan Menggunakan ESS .....	48
4.4.2 Simulasi <i>Study Case 2</i> .....	50
4.4.2.1 Hasil Simulasi Tanpa Menggunakan ESS .....	50
4.4.2.2 Hasil Simulasi Dengan Menggunakan ESS .....	51
4.5 Analisis Sistem IEEE 14 Bus Dengan Profil Beban Dinamis .....	55
4.5.1 Analisis <i>Study Case 1</i> .....	55
4.5.1.1 Analisis Tanpa Menggunakan ESS .....	55
4.5.1.2 Analisis Dengan Menggunakan ESS .....	55
4.5.1.3 Analisis Perbandingan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS .....	57
4.5.2 Analisis <i>Study Case 2</i> .....	59

4.5.2.1 Analisis Tanpa Menggunakan ESS .....	59
4.5.2.2 Analisis Dengan Menggunakan ESS.....	59
4.5.2.3 Analisis Perbandingan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS .....	61
4.5.3 Analisis Perbandingan Antara <i>Study Case</i> 1 dan 2 .....	63
<b>BAB 5 PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan .....	65
5.2 Saran.....	65
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>67</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>BIODATA PENULIS</b>	

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis-jenis Bus .....	8
Tabel 2.2	Karakteristik Jenis Baterai Dalam Sistem Tenaga.....	18
Tabel 4.1	Daya Pembangkitan PLTB di Bus 11 .....	34
Tabel 4.2	Data <i>Cost Function</i> Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi.....	36
Tabel 4.3	Data Profil Beban Sistem IEEE 14 Bus .....	36
Tabel 4.4	Daya Pembangkitan DOPF Tanpa <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 1 .....	37
Tabel 4.5	Daya Pembangkitan DOPF Dengan <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 1 .....	37
Tabel 4.6	Biaya Total Pembangkitan Untuk Profil Beban 1 .....	38
Tabel 4.7	Daya Pembangkitan DOPF Tanpa <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 2 .....	38
Tabel 4.8	Daya Pembangkitan DOPF Dengan <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 2 .....	38
Tabel 4.9	Biaya Total Pembangkitan Untuk Profil Beban 2 .....	39
Tabel 4.10	Daya Pembangkitan DOPF Tanpa <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 3 .....	39
Tabel 4.11	Daya Pembangkitan DOPF Dengan <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 3 .....	39
Tabel 4.12	Biaya Total Pembangkitan Untuk Profil Beban 3 .....	40
Tabel 4.13	Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Tanpa <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 1 .....	40
Tabel 4.14	Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Dengan <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 1 .....	41
Tabel 4.15	Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Tanpa <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 2 .....	42
Tabel 4.16	Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Dengan <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 2 .....	42
Tabel 4.17	Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Tanpa <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 3 .....	43
Tabel 4.18	Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Dengan <i>Ramp rate</i> Untuk Profil Beban 3 .....	44
Tabel 4.19	Dta Profil Beban Dinamis Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi .....	44
Tabel 4.20	Daya Pembangkitan DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada <i>Study Case</i> 1.....	46

Tabel 4.21	Daya Beban DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 1</i> .....	47
Tabel 4.22	Total Biaya Pembangkitan Tanpa Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 1</i> .....	48
Tabel 4.23	Daya Pembangkitan DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 1</i> .....	48
Tabel 4.24	Daya Beban DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 1</i> .....	49
Tabel 4.25	Total Biaya Pembangkitan Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 1</i> .....	50
Tabel 4.26	Daya Pembangkitan DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	50
Tabel 4.27	Total Biaya Pembangkitan Tanpa Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	51
Tabel 4.28	Daya Pembangkitan DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	51
Tabel 4.29	Total Biaya Pembangkitan Tanpa Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	52
Tabel 4.30	Daya Beban DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	53
Tabel 4.31	Daya Beban DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	54
Tabel 4.32	Daya Tak Terpakai Pada Sistem IEEE 14 Bus Study <i>Case 1</i> .....	55
Tabel 4.33	Besar Daya Pembangkitan Dari ESS Pada <i>Study</i> <i>Case 1</i> .....	56
Tabel 4.34	Perbandingan Daya Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 1</i> .....	57
Tabel 4.35	Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS .....	58
Tabel 4.36	Besar Daya Pembangkitan Dari ESS Pada <i>Study</i> <i>Case 2</i> .....	60
Tabel 4.37	Perbandingan Daya Tanpa Denga Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	61
Tabel 4.38	Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	62

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Tenaga Listrik.....	7
Gambar 3.1	Alur Pengerjaan Tugas Akhir .....	20
Gambar 4.1	<i>Single Line Diagram</i> IEEE 14 Bus Modifikasi .....	33
Gambar 4.2	Grafik Perbandingan P Potensi dan P Injeksi PLTB ....	35
Gambar 4.3	Profil Beban Untuk Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi ...	36
Gambar 4.4	Profil Beban Dinamis Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi	45
Gambar 4.5	Grafik Perbandingan Daya Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 1</i> .....	58
Gambar 4.6	Diagram Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 1</i> .....	59
Gambar 4.7	Grafik Perbandingan Daya Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	62
Gambar 4.8	Diagram Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada <i>Study Case 2</i> .....	63
Gambar 4.9	Diagram Perbandingan Total Daya Injeksi Antara <i>Study Case 1</i> dan <i>Study Case 2</i> .....	58
Gambar 4.10	Diagram Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Antara <i>Study Case 1</i> dan <i>Study Case 2</i> .....	59

*-- Halaman ini sengaja dikosongkan --*



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Angin merupakan sumber energi baru terbarukan yang tersedia di alam. Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau sering dikenal dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan energi angin sebagai bahan bakar. Pembangkit ini mengkonversi energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin (*wind turbine*).

Daya yang dibangkitkan oleh PLTB harus diinjeksikan ke sistem secara maksimal hal ini dikarenakan pembangkit listrik tenaga bayu tidak memerlukan biaya bahan bakar (gratis). Namun, seperti yang diketahui bahwa angin memiliki sifat yang relatif berubah-ubah. Sehingga daya yang dibangkitkan oleh PLTB juga berubah-ubah. Akan tetapi, perubahan daya dari PLTB cenderung tidak sesuai dengan kondisi permintaan beban. Dengan kata lain, daya dari PLTB relatif besar pada saat beban tidak puncak (*off peak load*) dan kecil pada saat beban puncak (*on peak load*). Untuk mengatasi hal tersebut biasanya digunakan sistem penyimpanan energi atau ESS (*Energy Storage System*) yang berfungsi untuk menampung atau menyimpan energi listrik saat jumlah permintaan rendah dan menyalurkan energi listrik yang tersimpan saat jumlah permintaan tinggi.

Penyimpanan energi atau ESS ini dipasang dan diintegrasikan dengan sistem untuk menyimpan daya yang tak terpakai / terbuang selama beberapa saat dan akan disalurkan kembali ke saluran sistem jika permintaan beban meningkat. Proses penyimpanan energi disebut proses pengisian ESS (*charging*), sedangkan proses penyaluran energi disebut proses pengeluaran ESS (*discharging*). Namun, daya atau energi yang disalurkan melalui kedua proses tersebut belum tentu optimal seiring dengan permintaan beban yang bertambah atau berubah-ubah setiap waktu.

*Optimal Power Flow* (OPF) merupakan perhitungan yang dilakukan untuk mengoptimalkan suatu fungsi yaitu biaya pembangkitan suatu pembangkit tenaga listrik dengan mengatur pembangkitan daya di masing-masing pembangkit yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batas-batas tertentu. Penggunaan OPF tersebut dinilai tidak mampu untuk memperhitungkan beban yang berubah-ubah, sehingga diperlukan

perhitungan baru yaitu *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF). Dengan penambahan batasan *ramp rate* dari setiap pembangkit, DOPF mampu mengoptimalkan suatu fungsi seiring dengan permintaan beban yang berubah-ubah.

Tugas akhir ini menggunakan algoritma *Sequential Quadratic Programming* (SQP) untuk menyelesaikan permasalahan DOPF secara optimal. Perhitungan dilakukan dengan modifikasi program Matpower di *software* MATLAB.

## 1.2 Permasalahan

Berbagai permasalahan yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Bagaimana membuat program pembangkitan optimal yang dinamis dengan memperhitungkan penggunaan ESS dan parameter *ramp rate* menggunakan *sequential quadratic programming*.
2. Bagaimana menentukan besar daya optimal yang dibangkitkan oleh unit pembangkit yang dinamis dengan memperhitungkan penggunaan ESS dan *ramp rate* generator.
3. Bagaimana mengetahui pengaruh dari penggunaan ESS terhadap parameter *ramp rate*, daya terbangkit, dan biaya pembangkitan.

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah :

1. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan adalah *sequential quadratic programming*.
2. Rugi-rugi tidak diperhitungkan.
3. Beban reaktif diasumsikan tetap (konstan).
4. *Ramp rate* dianggap sama untuk *ramp up* dan *ramp down*.
5. *Plant* menggunakan sistem IEEE 14 Bus yang telah dimodifikasi.
6. Beban yang digunakan tidak melebihi total kapasitas pembangkitan.
7. Semua pembangkit diasumsikan selalu dalam keadaan menyala (*on*).

## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini, sebagai berikut:

1. Membuat program pembangkitan optimal yang dinamis dengan memperhitungkan penggunaan ESS dan parameter *ramp rate* menggunakan *sequential quadratic programming*.
2. Menentukan besar daya optimal yang dibangkitkan oleh unit pembangkit yang dinamis dengan memperhitungkan penggunaan ESS dan *ramp rate* generator.
3. Mengetahui pengaruh dari penggunaan ESS terhadap parameter *ramp rate*, daya terbangkit, dan biaya pembangkitan.

## 1.5 Metode Penelitian

Tugas akhir ini akan dilakukan penelitian tentang *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) dengan memperhatikan penggunaan ESS, batasan *ramp rate* generator, dan batasan saluran dalam perhitungan dengan beban yang dinamis dalam rentang waktu tertentu. Metode perhitungan menggunakan *Sequential Quadratic Programming* (SQP). Data yang digunakan dalam tugas akhir ini, antara lain daya yang digunakan dari tempat penyimpanan energi sementara (ESS), biaya pembangkitan, batasan pembangkitan, *ramp rate* dari masing-masing unit pembangkit, dan beban selama rentang waktu tertentu dengan interval satu jam. Perhitungan optimal DOPF akan disimulasikan dengan menggunakan *software* Matlab dengan aplikasi Matpower yang telah dimodifikasi. Tahapan dalam pengerjaan tugas akhir ini, sebagai berikut:

### 1. Studi literatur

Studi literatur ini mengacu kepada literatur-literatur yang ada seperti jurnal, prosiding, *text book*, atau referensi tugas akhir sebelumnya yang berkaitan dengan tugas akhir ini. Dalam tahap ini, akan dipelajari hal-hal yang terkait dengan *Energy Storage System*, *Optimal Power Flow*, karakteristik saluran, pengaruh adanya batasan saluran dan *ramp rate* pada perhitungan OPF, dan penerapan *sequential quadratic programming* di Matlab.

### 2. Pengumpulan data

Pengumpulan data ini mencakup data generator, penggunaan ESS, data saluran, dan data beban. Data generator terdiri dari kapasitas pembangkitan maksimum dan minimum, biaya pembangkitan, dan *ramp rate* per jam untuk masing-masing pembangkit. Data penggunaan ESS terdiri dari kapasitas daya yang dapat disimpan dan disalurkan oleh ESS. Data saluran meliputi kapasitas di tiap saluran sistem. Sedangkan data beban

berupa beban dinamis dalam rentang waktu tertentu dengan interval waktu 1 jam.

3. Pembuatan program dengan aplikasi Matpower di Matlab dengan penerapan *sequential quadratic programming* pada *dynamic optimal power flow*.

Program yang dibuat akan diuji terlebih dahulu untuk sistem skala kecil, kemudian akan digunakan pada sistem dengan skala yang besar.

4. Simulasi dan analisis

Tugas akhir ini disimulasikan dengan empat kondisi yang terdiri dari kondisi pertama disimulasikan tanpa memperhitungkan kapasitas saluran dan *ramp rate*. Kondisi kedua disimulasikan dengan memperhitungkan kapasitas saluran namun tanpa *ramp rate*. Kondisi ketiga dengan memperhitungkan kapasitas saluran dan *ramp rate* dalam perhitungan DOPF. Sedangkan kondisi keempat dengan memperhitungkan penggunaan ESS. Data yang diperoleh hasil simulasi tersebut akan dianalisis untuk mengetahui biaya total pembangkitan.

5. Penulisan buku

Hasil dari tugas akhir ini akan ditulis dan dilaporkan dalam bentuk buku laporan tugas akhir. Laporan ini mengacu pada permasalahan yang ada dan hasil simulasi dan analisis akhir secara bertahap yang disertai dengan kesimpulan di bagian akhir buku laporan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

### Bab 1: PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari tugas akhir.

### Bab 2: ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENETRASI DAYA BESAR DARI PLTB

Bab ini berisi tentang landasan teori atau teori dasar mengenai *dynamic optimal power flow* yang merupakan pengembangan dari *optimal power flow*, penggunaan penyimpanan energi atau *Energy Storage System* (ESS), dan *sequential quadratic programming*.

Bab 3: PENERAPAN *SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING* PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS.

Bab ini menjelaskan tentang penerapan *sequential quadratic programming* pada permasalahan *dynamic optimal power flow* dengan meninjau penggunaan *energy storage system* pada unit pembangkit.

Bab 4: SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini menampilkan hasil simulasi *dynamic optimal power flow* dengan penetrasi daya menggunakan *energy storage system* pada unit pembangkit dengan beberapa kondisi.

Bab 5: PENUTUP

Bab ini merupakan akhir dari laporan yang berisi tentang kesimpulan dan saran mengenai hasil penulisan laporan tugas akhir yang telah diselesaikan.

## 1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dan manfaat bagi masyarakat, seperti:

1. Dapat memberikan manfaat terhadap pengembangan sistem tenaga listrik khususnya pada permasalahan *dynamic optimal power flow* dan penggunaan sistem penyimpanan energi (ESS).
2. Dapat menambah pengetahuan di bidang optimasi pembangkitan tenaga listrik bagi penulis dan masyarakat.
3. Dapat dijadikan sebagai bahan referensi bagi orang lain yang hendak mempelajari permasalahan yang serupa.

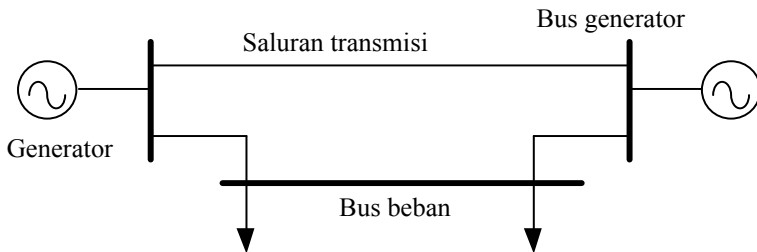
*-- Halaman ini sengaja dikosongkan --*

## BAB 2

### ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENETRASI DAYA BESAR DARI PLTB

#### 2.1 Studi Aliran Daya[1]

Secara umum sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa bagian antara lain : pembangkit, transmisi listrik, distribusi dan beban. Pembangkit merupakan bagian sistem tenaga listrik yang menghasilkan daya listrik dan kemudian daya disalurkan ke beban dalam sistem tenaga listrik melalui sebuah sistem transmisi. Sistem transmisi bertujuan untuk menyalurkan energi listrik dari pembangkit menuju sistem untuk menyuplai beban. Sistem distribusi adalah bagian yang menghubungkan gardu induk distribusi ke konsumen. Sistem distribusi membagi-bagikan energi listrik ke beban listrik sesuai permintaan dari konsumen. Beban adalah komponen daya listrik yang mengkonsumsi daya listrik.



**Gambar 2.1** Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik bisa terdiri dari ratusan titik dan cabang dengan harga impedansi tertentu yang dinyatakan dalam satuan per unit dari MVA *base*. Persamaan sistem dapat dirumuskan secara sistematis dalam bentuk yang bermacam-macam. Umumnya, metode titik (*bus*) tegangan yang paling cocok dan sering digunakan dalam berbagai analisis aliran daya. Saat arus titik tersebut ditentukan, maka persamaan tersebut dapat diselesaikan menggunakan nilai tegangan *-bus*-nya.

Berdasar hukum Kirchoff Arus, hubungan antara besar tegangan bus dan arus dinyatakan dalam persamaan titik tegangan.

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.1)$$

Persamaan di atas jika dinyatakan ke dalam bentuk matriks admitansi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Dimana

$n$  = jumlah total titik

$Y_{11}$  = admitansi sendiri dari titik i

$Y_{21}$  = mutual admitansi dari titik i dan j

$V_1$  = tegangan fasor pada titik i

$I_1$  = arus fasor yang mengalir ke titik i

Bentuk umum dari persamaan aliran daya dapat diturunkan dari persamaan matriks admitansi bus yang ditulis dalam bentuk daya[2]:

$$P_i - jQ_i = (V_i^*) \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_{ij}) \quad (2.3)$$

## 2.2 Aliran Daya Optimal

Studi aliran daya atau *Power Flow* (PF) adalah salah satu dari perencanaan sistem tenaga listrik yang menghasilkan perhitungan magnitude dan sudut fasa dari tegangan di setiap bus serta aliran daya aktif dan reaktif pada setiap saluran di sistem tenaga listrik. Pada studi aliran daya terdapat beberapa jenis bus yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Jenis – jenis Bus

Tipe bus	$P$	$Q$	$ E $	$\theta$	Keterangan
Beban	√	√			-
<i>Voltage controlled</i>	√		√		Daya dan tegangan f
Referensi			√	√	
<i>Synchronous Condenser</i>	√		√ saat, $Q^{\min} < Q_g < Q^{\max}$		<i>Synchronous Condenser</i> ( $P=0$ ) memiliki VAR limits $Q^{\min}$ : VAR minimum $Q^{\max}$ : VAR maksimum
	√	√ saat, $Q_g < Q^{\min}$ $Q_g > Q^{\max}$			

√: nilai dipertahankan konstan



Aliran daya optimal atau lebih dikenal dengan *Optimal Power Flow* (OPF) merupakan perhitungan untuk meminimalkan suatu fungsi yaitu biaya pembangkitan suatu pembangkit tenaga listrik atau rugi-rugi pada saluran transmisi dengan mengatur pembangkitan daya aktif dan reaktif setiap pembangkit yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batasan-batasan tertentu. Batasan yang umum dinyatakan dalam perhitungan analisis aliran daya optimal adalah batas minimum dan maksimum untuk pembangkitan daya aktif pada unit pembangkit. OPF dipakai untuk mengoptimasi aliran daya dari sistem tenaga listrik berskala besar. Caranya memperkecil fungsi objektif dengan mempertahankan daya yang dapat diterima dari batas kemampuan generator.

OPF yang paling umum, biasanya digunakan untuk meminimalkan suatu *objective function* berupa  $F(x,u)$  yang memenuhi batasan-batasan  $g(x,u) = 0$  dan  $h(x,u) \leq 0$ , dimana fungsi  $g(x,u)$  mempresentasikan batasan persamaan nonlinear (*nonlinear equality constraints*), sedangkan fungsi  $h(x,u)$  mempresentasikan batasan pertidaksamaan nonlinear (*nonlinear inequality constraints*). Vektor  $x$  sendiri biasanya berisi variabel-variabel seperti *voltage magnitude*, sudut fasanya, dan keluaran MVAR dari generator yang didesain untuk pengaturan tegangan bus. Vektor  $x$  juga bisa berisi parameter-parameter yang bernilai tetap seperti sudut fasa pada *reference bus*, *line parameter*, dan lain-lain. Sedangkan vektor  $u$  berisi variabel kontrol yang meliputi daya aktif dan reaktif dari pembangkitan serta beban MW dan MVAR[3].

Adapun jenis-jenis penggunaan OPF yang sering digunakan dewasa ini, antara lain:

1. OPF untuk meminimalkan biaya pembangkitan
2. OPF untuk meminimalkan *losses* daya aktif
3. OPF untuk perencanaan daya reaktif (MVAR)

Dalam tugas akhir ini, digunakan perhitungan OPF untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan disimulasikan menggunakan Matpower di *software* Matlab.

### 2.3 Persamaan Matematis OPF[4]

Persamaan dari optimal power flow dari segi biaya pembangkitan dapat direpresentasikan pada persamaan berikut ini:

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.4)$$

dimana :

$F_i$  = besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke- $i$  (Rp)

$P_i$  = daya *output* dari pembangkit ke- $i$  (MW)

$a_i, b_i$ , dan  $c_i$  = *cost coefficient* unit generator ke- $i$

Dalam menyelesaikan suatu masalah optimasi, seperti OPF, ada dua batasan, yakni *equality* dan *inequality constraints*. *Equality constraints* merupakan batasan yang harus diikuti, seperti persamaan keseimbangan daya (*power balance*) aktif dan reaktif pada sistem. Sedangkan didalam ketetapan, *inequality constraints* boleh atau tidak mungkin mengikat.

*Equality constraints* pada OPF mempunyai persamaan dibawah ini:

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.6)$$

dimana:

$i = 1, 2, \dots, n$  menyatakan jumlah bus.  $P_i$  dan  $Q_i$  menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus  $i$ .  $P_{gi}$  dan  $Q_{gi}$  menyatakan daya aktif dan reaktif generator di bus  $i$ .  $P_{di}$  dan  $Q_{di}$  menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus  $i$ .  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  menyatakan elemen dari matriks Y-bus dari bus  $i$  ke bus  $j$ .

*Inequality constraints* merepresentasikan batasan operasi dan batasan ini dibuat untuk batas keamanan. Dibawah ini persamaan inequality constraints pada OPF :

Batasan daya

$$P_{gi} \min \leq P_{gi} \leq P_{gi} \max \quad (2.7)$$

$$Q_{gi} \min \leq Q_{gi} \leq Q_{gi} \max \quad (2.8)$$

dimana:

$P_{gi} \min$  dan  $Q_{gi} \min$  menyatakan batasan minimum daya aktif dan reaktif dari generator. Sedangkan  $P_{gi} \max$  dan  $Q_{gi} \max$  menyatakan batasan maksimum daya aktif dan reaktif dari generator.

Batasan saluran

$$|S_j| \leq S_j \max \quad (2.9)$$

Besarnya aliran daya di setiap saluran tidak boleh melampaui batasan kapasitasnya.

## 2.4 Aliran Daya Optimal Dinamis

Aliran daya optimal dinamis atau lebih dikenal dengan *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) merupakan pengembangan dari OPF yang digunakan untuk melakukan optimasi pembangkit dengan beban yang selalu berubah atau dinamis. Dalam tugas akhir ini, beban dinamis diasumsikan sebagai perubahan beban yang terjadi setiap interval 1 jam.

Dalam permasalahan secara *realtime*, suatu pembangkit harus mampu membangkitkan daya yang sesuai dengan perubahan beban. Namun, di satu sisi suatu pembangkit harus memperhatikan batasan dari karakteristik pembangkit itu sendiri. Batasan tersebut sering dikenal dengan batasan *ramp rate*, dimana suatu pembangkit tidak boleh membangkitkan daya melewati batas *ramp rate* yang ada dalam satu interval waktu. Pembatasan dengan *ramp rate* ini bertujuan untuk menjaga *life time* dari suatu pembangkit.

Dengan adanya batasan *ramp rate*, maka jumlah *constraints* atau batasan dalam perhitungan OPF menjadi bertambah. *Ramp rate* berfungsi sebagai hubungan antara pembangkitan pada waktu sebelumnya dan waktu sesudahnya dalam interval waktu yang telah ditentukan.

Perumusan DOPF dikembangkan dari permasalahan OPF yakni dengan menambahkan batasan *ramp rate*. Permasalahan dari penambahan batasan *ramp rate* ini adalah meluasnya zona waktu dari *multiple intervals* pada DOPF. *Cost function* dari pembangkit ke- $i$  pada interval waktu ke- $t$  dapat dimodelkan dalam persamaan berikut ini:

$$F_i^t(P_i^t) = a_i P_i^{t^2} + b_i P_i^t + c_i \quad (2.10)$$

$P_i^t$  adalah daya *output* dari pembangkit ke- $i$  pada saat  $t$  dan  $a_i$ ,  $b_i$ , dan  $c_i$  adalah *cost coefficient* unit pembangkit ke- $i$ .

Fungsi objektif pada permasalahan DOPF dapat ditulis pada persamaan (2.8) berikut ini:

$$\text{minimize } C \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_i^t(P_i^t) \quad (2.11)$$

Persamaan (2.8) bertujuan untuk meminimalkan biaya pembangkitan dari semua unit pembangkit selama  $T$ -interval waktu,

dengan  $T$  adalah zona waktu diskrit.  $P_i^t$  adalah daya *output* dari pembangkit ke- $i$  pada waktu- $t$

Fungsi objektif diatas diminimalkan melalui batasan, sebagai berikut:

1. *Real power balance*

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = V_i^t \sum_{j=1}^n V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.12)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = V_i^t \sum_{j=1}^n V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.13)$$

Dimana:

$i = 1, 2, \dots, n$ , menyatakan jumlah bus.  $P_i^t$  dan  $Q_i^t$  menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus  $i$  selama t-interval waktu.  $P_{gi}^t$  dan  $Q_{gi}^t$  menyatakan daya aktif dan reaktif generator di bus  $i$  selama t-interval waktu.  $P_{di}^t$  dan  $Q_{di}^t$  menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus  $i$  selama t-interval waktu.  $Y_{ij} = G_{ij} + B_{ij}$  menyatakan elemen dari matriks Y-bus dari bus  $i$  ke bus  $j$ .

2. *Capacity constraint*

$$P_{gi} \min \leq P_{gi}^t \leq P_{gi} \max \quad (2.14)$$

$$Q_{gi} \min \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi} \max \quad (2.15)$$

dimana:

$P_{gi} \min$  dan  $Q_{gi} \min$  menyatakan batasan minimum daya aktif dan reaktif dari generator. Sedangkan  $P_{gi} \max$  dan  $Q_{gi} \max$  menyatakan batasan maksimum daya aktif dan reaktif dari generator.

3. *Ramp constraint*

$$-\delta_i \leq P_{i(t+1)} - P_{it} \leq \delta_i \quad (2.16)$$

$\delta$  adalah *ramp limit* dari pembangkit ke- $i$ . Dalam tugas akhir ini, *ramp rate* diasumsikan pada nilai yang sama. *Ramp rate* juga dapat diasumsikan memiliki nilai yang dinamis.

## 2.5 OPF Dengan Penetrasi Daya Dari Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Secara umum, bentuk OPF untuk menyelesaikan permasalahan daya dari sistem pembangkit tenaga bayu yang masuk ke sistem, yaitu memaksimalkan injeksi daya dari sistem pembangkit tenaga bayu.

### Fungsi Objektif

$$\text{Max } Pad_i = \sum_{i=0}^n Pdgi_i \times CI_i \quad (2.17)$$

Bus yang terhubung dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) memiliki persamaan batasan sebagai berikut:

#### Batasan Persamaan

Persamaan *power balance*

$$Pg_i + Pad_i - Pd_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (2.18)$$

$$Qg_i - Qd_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (2.19)$$

#### Batasan Pertidaksamaan

1. Batasan kapasitas pembangkit:

$$Pg_{i\min} \leq Pg_i \leq Pg_{i\max} \quad (2.20)$$

$$Qg_{i\min} \leq Qg_i \leq Qg_{i\max} \quad (2.21)$$

2. Batasan tegangan:

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad (2.22)$$

3. Batasan saluran transmisi:

$$S_l \leq S_{l\max} \quad (2.23)$$

Di mana:

$Pad_i$  : total daya injeksi yang mampu ditampung bus  $i$

$PDGI_i$  : daya yang dibangkitkan PLTB di bus  $i$

$CI_i$  : indeks pembatas di bus  $i$

$Pd_i$  : beban aktif di bus  $i$

$Pg_i$  : besar pembangkitan daya aktif di bus  $i$

$Qg_i$  : besar pembangkitan daya reaktif di bus  $i$

$V_i$  : magnitude tegangan di bus  $i$   
 $V_j$  : magnitude tegangan di bus  $j$   
 $G_{ij}, B_{ij}$  : admitansi saluran  $i$ - $j$   
 $\theta_i$  : sudut fasa tegangan di bus  $i$   
 $\theta_j$  : sudut fasa tegangan di bus  $j$   
 $S_l$  : aliran daya saluran  $l$

Sedangkan untuk bus-bus yang tidak terhubung dengan PLTB memiliki persamaan sebagai berikut:

### Batasan Persamaan

Persamaan *power balance*

$$P_i = Pg_i - Pd_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (2.24)$$

$$Q_i = Qg_i - Qd_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (2.25)$$

### Batasan Pertidaksamaan

1. Batasan kapasitas pembangkit:

$$Pg_{i\min} \leq Pg_i \leq Pg_{i\max} \quad (2.26)$$

$$Qg_{i\min} \leq Qg_i \leq Qg_{i\max} \quad (2.27)$$

2. Batasan tegangan:

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad (2.28)$$

$$\theta_{i\min} \leq \theta_i \leq \theta_{i\max} \quad (2.29)$$

3. Batasan saluran transmisi:

$$S_l \leq S_{l\max} \quad (2.30)$$

Di mana:

$P_i$  : injeksi daya aktif di bus  $i$   
 $Q_i$  : injeksi daya reaktif di bus  $i$   
 $Pd_i$  : beban aktif di bus  $i$   
 $Pg_i$  : besar pembangkitan daya aktif di bus  $i$   
 $Qg_i$  : besar pembangkitan daya reaktif di bus  $i$   
 $\theta_i$  : sudut fasa tegangan di bus  $i$   
 $\theta_j$  : sudut fasa tegangan di bus  $j$

## 2.6 Sequential Quadratic Programming (SQP)

*Sequential Quadratic Programming* (SQP) merupakan metode paling populer untuk *nonlinear constraint optimization*. Metode SQP bekerja dengan mengkonversi fungsi-fungsi umum menjadi fungsi kuadrat. Metode ini menghasilkan subproblem dari *quadratic programming* pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya. Jika penyelesaian awal dari sebuah fungsi dinyatakan dengan  $x^{(0)}$ , maka deret Taylor orde kedua dari  $f(x)$  dapat ditulis dalam persamaan berikut ini:

$$q(x) = f(x^{(0)}) + \nabla f(x^{(0)})^T (x - x^{(0)}) + \frac{1}{2} (x - x^{(0)})^T \nabla^2 f(x^{(0)}) (x - x^{(0)}) \quad (2.31)$$

Metode yang dibahas pada bagian ini adalah untuk menaksir nilai *objective function* dengan fungsi kuadrat. Sedangkan nilai batasan-batasan ditaksir dengan fungsi linear. Jika hasil akhir pada iterasi ke  $t$  dari permasalahan diatas digambarkan dengan  $x^{(t)}$ , maka permasalahan *quadratic programming* menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \min & f(x^{(t)}) + \nabla f(x^{(t)})^T (x^{(t+1)} - x^{(t)}) \\ & + \frac{1}{2} (x^{(t+1)} - x^{(t)})^T \nabla^2 f(x^{(t)})^T (x^{(t+1)} - x^{(t)}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Dengan

$$h_k(x^{(t)}) + \nabla h_k(x^{(t)})^T (x^{(t+1)} - x^{(t)}) = 0 \text{ untuk } h = 1, 2, \dots, k \quad (2.33)$$

$$g_j(x^{(t)}) + \nabla g_j(x^{(t)})^T (x^{(t+1)} - x^{(t)}) \geq 0 \text{ untuk } g = 1, 2, \dots, j \quad (2.34)$$

Pada metode SQP, setiap permasalahan quadratic programming akan diselesaikan menggunakan solusi yang diperoleh dari iterasi sebelumnya. Untuk lebih mudah memahami, dibawah ini akan dijelaskan contoh dari penggunaan metode SQP dalam 2 kali iterasi.

$$\min f(x) = 6x_1x_2^{-1} + x_1^{-2}x_2$$

$$\text{Dengan } h(x) = x_1x_2 - 2 = 0 \text{ dan } g(x) = x_1 + x_2 - 1 \geq 0$$

Pertama-tama kita tentukan nilai perkiraan awal dari persoalan di atas yaitu  $x^{(0)} = [2, 1]^T$ . Selanjutnya adalah mencari nilai gradient ( $\nabla f(x)$ ) dan Hessian ( $\nabla^2 f(x)$ ) dari fungsi objektif diatas.

$$\nabla f(x) = \begin{bmatrix} 6x_2^{-1} - 2x_1^{-3}x_2 \\ -6x_1x_2^{-2} + x_1^{-2} \end{bmatrix}$$

$$\nabla^2 f(x) = \begin{bmatrix} 6x_1^{-4}x_2 & -6x_2^{-2} - 2x_1^{-3} \\ -6x_2^{-2} - 2x_1^{-3} & 12x_1x_2^{-2} \end{bmatrix}$$

$$\nabla h(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya adalah penyelesaian iterasi pertama ( $t=0$ ) dari fungsi objektif diatas.

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{49}{4} + \frac{23}{4}(x_1^{(1)} - 2) - \frac{47}{4}(x_2^{(1)} - 1) + \frac{3}{16}(x_1^{(1)} - 2)^2 \\ & - \frac{25}{4}(x_1^{(1)} - 2)(x_2^{(1)} - 1) + 12(x_2^{(1)} - 1)^2 \end{aligned}$$

$$\text{Dengan } (x_1^{(1)} - 2) + 2(x_2^{(1)} - 1) = 0$$

$$(x_1^{(1)} - 2) + (x_2^{(1)} - 1) + 2 \geq 0$$

Kemudian diperoleh solusi optimal dari persamaan kuadrat diatas adalah

$$x^{(1)} = [1.07921, 1.46040]^T$$

Berikutnya adalah penyelesaian pada iterasi kedua ( $t=1$ )

$$\begin{aligned} \min \quad & 5.687791 + 1.78475(x_1^{(2)} - 1.07921) \\ & - 2.17750(x_2^{(2)} - 1.4604) + 3.22975(x_1^{(2)} - 1.07921)^2 \\ & - 4.4044(x_1^{(2)} - 1.07921)(x_2^{(2)} - 1.4604) \\ & + 2.07895(x_2^{(2)} - 1.4604)^2 \end{aligned}$$

Dengan



$$1.4604(x_1^{(2)} - 1.07921) + 1.07921(x_2^{(2)} - 1.4604) - 0.42393 = 0$$

$$(x_1^{(2)} - 1.07921) + (x_2^{(2)} - 1.4604) + 1.5396 \geq 0$$

Solusi optimal dari iterasi yang kedua adalah

$$x^{(2)} = [1.04878, 1.89440]^T$$

## 2.7 Penyimpan Energi

Penyimpan energi adalah suatu alat yang digunakan untuk menyimpan energi listrik ketika jumlah permintaannya sedikit (*off peak*) dan menyalurkan energi listrik yang tersimpan tersebut pada saat jumlah permintaan tinggi (*on peak*). Beberapa manfaat penggunaan sistem penyimpanan energi didalam sistem kelistrikan, antara lain :

1. Perbaikan faktor daya
2. Mengurangi rugi-rugi transmisi
3. Cadangan berputar (*spinning reserve*)
4. *Emergency backup*
5. Keuntungan secara ekonomis

Selain hal diatas, penyimpan energi juga digunakan untuk meningkatkan kapabilitas dari suatu sumber energi terbarukan. Sumber energi terbarukan seperti pembangkit tenaga angin / bayu dan surya, daya yang dihasilkan dari pembangkit tersebut mengalami fluktuasi berdasarkan kondisi alam. Sehingga untuk memaksimalkan penyaluran daya yang dibangkitkan oleh pembangkit tersebut digunakan penyimpan energi.

Seiring dengan dikembangkannya sumber energi terbarukan sebagai pembangkit energi listrik, maka penggunaan penyimpan energi kini semakin penting. Saat ini, banyak dikembangkan berbagai jenis sistem penyimpanan energi. Salah satunya adalah penggunaan *Energy Storage System* (ESS). Baterai adalah salah satu jenis penyimpan energi yang paling banyak digunakan. Kelebihan baterai untuk penggunaannya sebagai penyimpan energi yaitu memiliki tingkat kerapatan energi yang tinggi, siklus kerja yang lebih baik, tingkat keandalan yang tinggi, serta biaya yang lebih rendah.

Saat ini, teknologi baterai mengalami perkembangan yang sangat signifikan. Baterai yang digunakan dalam aplikasi sistem tenaga memiliki kapasitas energi mulai dari 17 hingga 40 MWh dan memiliki efisiensi 70 sampai 80 %.[5]

Adapun jenis-jenis dari Baterai *Energy Storage System* (ESS), antara lain:

1. *Lead Acid Battery* (LA)  
Baterai *lead acid* memiliki kelebihan yakni biaya yang rendah, respon waktu yang cepat, dan memiliki efisiensi sebesar 75-90%. Sehingga dengan adanya kelebihan tersebut, baterai *lead acid* banyak digunakan sebagai penyimpan energi.
2. Sodium Sulfur (NaS)  
Adalah salah satu jenis baterai yang mampu menyimpan energi dalam jumlah yang besar. Baterai jenis ini masih dalam pengembangan dalam penggunaan aplikasinya.
3. *Regenerative Fuel Cell*(PSB)  
PSB adalah teknologi sel bahan bakar regeneratif yang menyediakan reaksi elektrokimia *reversibel* antara dua larutan garam elektrolit (natrium bromida dan natrium polysulphide). PSB elektrolit dibawa berdekatan di mana sel-sel baterai mereka dipisahkan oleh membran polimer yang hanya memungkinkan ion natrium positif untuk pergi melalui, memproduksi sekitar 1.5V.

Karakteristik dan spesifikasi dari jenis-jenis baterai diatas, dapat dilihat pada berikut ini:

**Tabel 2.2** Karakteristik Baterai Dalam Sistem Tenaga[5]

<b>Jenis Baterai</b>	<b>Kapasitas</b>	<b>Lokasi &amp; Aplikasi</b>
Lead Acid ( <i>flooded type</i> )	10 MW/40MWh	California-Chino
Sodium Sulfur (NaS)	9.6 MW/64MWh	Tokyo, Jepang
Regenerative fuel cell (PSB)	15 MW/120 MWh (tahap pengembangan)	Innogy's Station, UK

### **BAB 3**

## **PENERAPAN *SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING* (SQP) PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS**

Dalam tugas akhir ini, *Sequential Quadratic Programming* (SQP) digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal dinamis atau *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) pada suatu sistem kelistrikan. Pengolahan data diperhitungkan menggunakan program matlab dan disimulasikan menggunakan software Matlab.

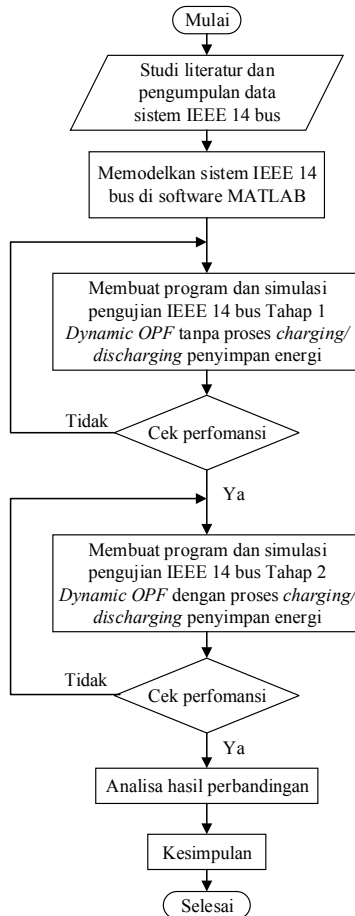
*Sequential Quadratic Programming* (SQP) adalah salah satu metode paling populer untuk optimasi nonlinier dimana metode ini menggunakan pendekatan *Lagrange* dan *Newton*. Metode SQP bekerja dengan mengkonversi persoalan-persoalan nonlinier menjadi bentuk kuadratik. Metode ini menghasilkan subproblem dari *quadratic programming* pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya.

### **3.1 Algoritma**

Pengerjaan tugas akhir ini dimulai dengan pengumpulan data saluran, data beban serta data pembangkit pada IEEE 14 bus dan asumsi kapasitas *Energy Storage System* (ESS). Kemudian sistem tersebut dimodelkan dalam *casefile* menggunakan program Matlab. Selanjutnya akan ditentukan *objective function*, variabel yang akan dioptimasi. Pembuatan program ini dilakukan dalam dua tahap.

Pada tahap 1, sistem IEEE 14 bus disimulasikan tanpa menggunakan *Energy Storage System* (ESS). Sedangkan pada tahap 2 simulasi dilakukan dengan menggunakan ESS. Kedua tahap tersebut disimulasikan dengan tujuan untuk mengetahui daya pembangkitan dan total biaya pembangkitan yang optimal ketika menggunakan ESS dan tanpa menggunakan ESS.

Setelah dilakukan simulasi, hasil simulasi dibandingkan antara simulasi tanpa menggunakan ESS dan dengan menggunakan ESS. Perbandingan meliputi hasil pembangkitan dan total biaya pembangkitan. Dari hasil perbandingan yang ada, kemudian dilakukan analisis dan disimpulkan sebagai kesimpulan dalam tugas akhir. Skema diagram alir dari algoritma ini dapat dilihat pada gambar 3.1



**Gambar 3.1** Alur Pengerjaan Tugas Akhir

### 3.2 Program Matpower

Dalam simulasi dengan matpower semua bus diberi nomor berurutan, dimulai pada 1, dan generator disebut berdasarkan nomor bus di mana generator tersebut terhubung. Berdasarkan kelebihan dari bahasa pemrograman Matlab dalam menangani matriks dan vektor, maka model dan persamaan yang disajikan di matpower juga dalam bentuk matriks dan vektor.

Program matpower dapat menyelesaikan permasalahan *Optimal Power Flow* (OPF). Persamaan *optimal power flow* pada umumnya ditulis pada persamaan berikut ini:

$$\min_x f(x) \quad (3.1)$$

*Subject to:*

$$g(x) = 0 \quad (3.2)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (3.3)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.4)$$

Optimasi vektor  $x$  terdiri dari magnitude tegangan ( $V_m$ ), sudut fasa tegangan ( $\theta$ ), daya aktif ( $P_g$ ), dan daya reaktif ( $Q_g$ ), maka  $x$  dapat ditulis sebagai persamaan dibawah ini:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

### 3.3 Sintaksis *Sequential Quadratic Programming* (fmincon)

Adapun sintaksis metode *sequential quadratic programming* di matlab, antara lain:

- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b)$   
Untuk meminimalkan fungsi  $x$  dengan nilai awal  $x_0$  yang diuraikan dalam fungsi  $\text{fun}$  pada *inequality constraints linear*  $A*x \leq b$ , dimana  $x_0$  akan menjadi skalar, vektor, atau matrix.
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq)$   
Meminimalkan subjek  $\text{fun}$  ke *equality constraints linear*  $Aeq*x \leq beq$  dan  $A*x \leq b$ . jika tidak ada *inequalities*, maka  $A = []$  dan  $B = []$ .
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$   
Mendefinisikan batas bawah dan batas atas dalam variabel  $x$ , sehingga solusinya akan selalu dalam batasan  $lb \leq x \leq ub$ . Jika ada *equality* yang tidak mempunyai batasan, maka  $Aeq = []$  dan  $beq = []$  dan jika  $lb$  tidak terbatas disetting  $lb = -\text{inf}$  begitu juga untuk  $ub$ .
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon})$

Meminimalkan *inequality constraints nonlinear*  $c(x)$  atau *equality constraints*  $CEQ(x)$  yang didefinisikan dalam `nonlcon`. `fmincon` mengoptimalkan sedemikian rupa sehingga  $c(x) \leq 0$  dan  $CEQ(x) = 0$ .

- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon}, \text{options})$   
Meminimalkan dengan optimasi *option* yang ditentukan dalam struktur *option*, dengan optimset untuk pengaturan *option*. Jika tidak terdapat batasan *equality constraints* dan *inequality constraints* maka `nonlcon` = [].
- $x = \text{fmincon}(\text{problem})$   
Mendapatkan nilai minimum untuk *problem*, dimana struktur *problem* dijelaskan dalam *input argument*.
- $[x, fval] = \text{fmincon}(\dots)$   
Mengembalikan nilai objektif dari fungsi *fun* pada solusi  $x$ .
- $[x, fval, \text{exitflag}] = \text{fmincon}(\dots)$   
Mengisikan kembali nilai *exitflag* yang mendeskripsikan kondisi keluaran *fmincon*.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}] = \text{fmincon}(\dots)$   
Mengisikan kembali struktur keluaran dengan informasi tentang optimasi.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}] = \text{fmincon}(\dots)$   
Mengisikan kembali struktur *lambda* dengan bagian yang berisi pengali *Lagrange* sebagai solusi  $x$ .
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}] = \text{fmincon}(\dots)$   
Mengisikan kembali nilai *gradient* sebagai solusi  $x$ .
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}, \text{hessian}] = \text{fmincon}(\dots)$   
Mengisikan kembali nilai-nilai dari *hessian* sebagai solusi  $x$ .

### 3.4 Input Argumen dari SQP (fmincon)

Berikut ini merupakan input argument dari *sequential quadratic programming*, yaitu:

- `fun` Sebuah fungsi yang dimaksimalkan dan merupakan fungsi yang diisikan vektor  $x$  kemudian mengembalikan skalar  $f$  yang fungsi tujuan dievaluasi pada  $x$ . pada penulisannya di Matlab *myfun*.
- `x0` *Optional*. Vektor yang menyatakan *initial point* dari algoritma *fmincon*.

Aineq	Matriks yang menyatakan koefisien linier dari <i>inequality constraints</i> $A * x \leq b$ .
bineq	Vektor yang menyatakan vektor konstan pada <i>inequality constraints</i> $A * x \leq b$ .
Aeq	Matriks yang menyatakan koefisien linier dari <i>equality constraints</i> $Aeq * x = beq$ .
beq	Vektor yang menyatakan vektor konstan pada <i>equality constraints</i> $Aeq * x = beq$ .
Lb	Vektor yang menyatakan batas bawah ( <i>low bounds</i> ) dari permasalahan $lb \leq x \leq ub$ .
Ub	Vektor yang menyatakan batas atas ( <i>up bound</i> ) dari permasalahan $lb \leq x \leq ub$ .
Nonlcon	fungsi untuk batasan <i>nonlinear</i> .

### 3.5 Sequential Quadratic Programming Pada DOPF

Pada tugas akhir ini, SQP menggunakan program *Matpower* yang telah di modifikasi pada *software* Matlab.

#### 3.5.1 Inisialisasi Permasalahan DOPF

Fungsi biaya (*cost function*) sebagai persamaan kuadratik.

$$F_i^t(P_i^t) = a_i P_i^{t2} + b_i P_i^t + c_i \quad (3.6)$$

$P_i$  adalah daya keluaran dari unit ke- $i$  dan  $a_i$ ,  $b_i$  dan  $c_i$  adalah *cost coefficient* unit generator ke- $i$ , sehingga

$$\text{minimize } C \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_i^t(P_i^t) \quad (3.7)$$

Subject to

- *Equality constraint*

*Equality constraint* dari permasalahan *dynamic optimal power flow* ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = V_i^t \sum_{j=1}^n V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (3.8)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = V_i^t \sum_{j=1}^n V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (3.9)$$

dimana  $i = 1, 2, \dots, n$  dan  $\theta_{ij}^t = \theta_i^t - \theta_j^t$ , yang menyatakan sudut tegangan dari dua bus yang berubah-ubah pada setiap saluran, dan

$n$  di representasikan sebagai jumlah bus,  $P_i^t$  dan  $Q_i^t$  adalah injeksi daya aktif dan reaktif di bus  $i$ .  $P_{gi}^t$  dan  $Q_{gi}^t$  adalah pembangkitan daya aktif dan reaktif pada generator ke-  $i$ , sedangkan untuk  $P_{di}^t$  dan  $Q_{di}^t$  adalah pembangkitan daya aktif dan reaktif pada beban ke-  $i$ .  $G_{ij}$  dan  $B_{ij}$  juga didefinisikan sebagai :

$Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} - jB_{ij}$ , dimana  $Y_{ij}$  adalah elemen matrik admitansi ke-  $ij$ .

- *Inequality constraint*  
*Inequality constraint* dari permasalahan *dynamic optimal power flow* ditunjukkan pada persamaan (3.10-3.13):

$$P_{gi \min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi \max} \quad (3.10)$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi \max} \quad (3.11)$$

$$V_{i \min} \leq V_i^t \leq V_{i \max}, i = 1, 2, \dots, N_{bus} \quad (3.12)$$

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij \max} \quad (3.13)$$

- *Ramp rate constraint*

$$-\delta_i \leq P_{i(t+1)} - P_{it} \leq \delta_i \quad (3.14)$$

$\delta$  adalah *ramp limit* dari generator -  $i$ .

### 3.5.2 Inisialisasi $x_0$ Sebagai Nilai Awal

Dalam pemrograman optimasi dengan fungsi *fmincon* membutuhkan input argumen  $x_0$  sebagai nilai awal. Variabel  $x_0$  terdiri dari sudut tegangan, magnititude tegangan, daya aktif, dan daya reaktif.

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ v_{m1} \\ v_{m2} \\ v_{m3} \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$



Misalnya dalam suatu sistem terdapat 3 bus (nb=3) dan 2 generator (ng=2). Maka matriks  $x_0$  dapat ditulis seperti persamaan (3.15). Sedangkan untuk level beban dalam rentang waktu tertentu sebesar  $t$ , maka ukuran matriks  $x_0$  akan menjadi persamaan (3.16):

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_{1 \ 1} \\ \theta_{2 \ 1} \\ \theta_{3 \ 1} \\ v_{m1 \ 1} \\ v_{m2 \ 1} \\ v_{m3 \ 1} \\ P_{g1 \ 1} \\ P_{g2 \ 1} \\ Q_{g1 \ 1} \\ Q_{g2 \ 1} \\ \vdots \\ \theta_{1 \ t} \\ \theta_{2 \ t} \\ \theta_{3 \ t} \\ v_{m1 \ t} \\ v_{m2 \ t} \\ v_{m3 \ t} \\ P_{g1 \ t} \\ P_{g2 \ t} \\ Q_{g1 \ t} \\ Q_{g2 \ t} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \left. \begin{array}{c} \text{Jam ke-1} \end{array} \right\} \\ \left. \begin{array}{c} \text{Jam ke-t} \end{array} \right\} \end{array} \quad (3.16)$$

$x_0$  merupakan nilai awal yang digunakan untuk memulai proses pencarian variabel yang dioptimasi.

### 3.5.3 Pembentukan Fungsi Objektif $F$ dan $DF$

$F$  adalah nilai biaya atau fungsi biaya pembangkitan, sedangkan  $DF$  merupakan turunan dari fungsi pembangkitan. Nilai  $F$  akan dijumlahkan pada setiap level beban dan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$F = \sum_{i=1}^{jam} F_i \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{DF} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{dF}{dP_{g1}} \\ \frac{dF}{dP_{g2}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18a) \\
\mathbf{DF} &= \begin{bmatrix} 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ \frac{dF}{dP_{g1_1}} \\ \frac{dF}{dP_{g2_1}} \\ 0_1 \\ 0_1 \\ \vdots \\ 0_t \\ 0_t \\ 0_t \\ 0_t \\ 0_t \\ 0_t \\ \frac{dF}{dP_{g1_t}} \\ \frac{dF}{dP_{g2_t}} \\ 0_t \\ 0_t \end{bmatrix} \quad (3.18b)
\end{aligned}$$

*Equality constraint* dalam permasalahan *optimal power flow* direpresentasikan dalam bentuk matriks *geq* dan *dgeq*, dimana kedua matriks tersebut disebut sebagai *power balance*. Misalnya dalam suatu sistem terdiri dari 3 bus ( $nb=3$ ) dan 2 generator ( $ng=2$ ). Maka bentuk dan ukuran matriks awal *geq* dapat dilihat pada persamaan 3.19.

$$geq = \begin{bmatrix} P_{L1} \\ \vdots \\ P_{L3} \\ Q_{L1} \\ \vdots \\ Q_{L3} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Sedangkan untuk level beban dalam rentang waktu tertentu sebesar  $t$ , maka bentuk matriks  $geq$  akan menjadi sebagai berikut:

$$geq = \begin{bmatrix} P_{L1\ 1} \\ \vdots \\ P_{L3\ 1} \\ Q_{L1\ 1} \\ \vdots \\ Q_{L3\ 1} \\ P_{L1\ t} \\ \vdots \\ P_{L3\ t} \\ Q_{L1\ t} \\ \vdots \\ Q_{L3\ t} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \begin{array}{c} P_{L1\ 1} \\ \vdots \\ P_{L3\ 1} \end{array} \right\} \text{Beban daya aktif jam ke-1} \\ \left. \begin{array}{c} Q_{L1\ 1} \\ \vdots \\ Q_{L3\ 1} \end{array} \right\} \text{Beban daya reaktif jam ke-1} \\ \left. \begin{array}{c} P_{L1\ t} \\ \vdots \\ P_{L3\ t} \end{array} \right\} \text{Beban daya aktif jam ke-}t \\ \left. \begin{array}{c} Q_{L1\ t} \\ \vdots \\ Q_{L3\ t} \end{array} \right\} \text{Beban daya reaktif jam ke-}t \end{array} \quad (3.20)$$

Matriks  $dgeq$  merupakan turunan dari  $geq$ , pada matriks  $dgeq$  untuk setiap variabel diturunkan terhadap variabel yang akan dioptimalkan, sehingga variabel lain akan bernilai nol. Apabila dimisalkan  $b$  adalah jumlah pembangkitan setiap bus, maka bentuk matriks akan ditunjukkan pada persamaan (3.21).

Sedangkan untuk level beban dalam rentang waktu tertentu sebesar  $t$ , maka bentuk matriks  $dgeq$  akan menjadi persamaan (3.22)

$$dgeq = \begin{bmatrix} dgeq_1 & zeros & zeros & zeros \\ zeros & dgeq_2 & zeros & zeros \\ zeros & zeros & \ddots & zeros \\ zeros & zeros & zeros & dgeq_t \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \text{Jam ke-1} \\ \rightarrow \text{Jam ke-2} \\ \rightarrow \vdots \\ \rightarrow \text{Jam ke-}t \end{array} \quad (3.21)$$

*aktif power balance*

*reaktif power balance*

$$d_{geq} = \begin{bmatrix} \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} & \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{d\theta_{n1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{nb}} & \frac{geq}{d\theta_{n1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{nb}} \\ \frac{geq}{dVm_{11}} & \dots & \frac{geq}{dVm_{1b}} & \frac{geq}{dVm_{11}} & \dots & \frac{geq}{dVm_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dVm_{n1}} & \dots & \frac{geq}{dVm_{nb}} & \frac{geq}{dVm_{n1}} & \dots & \frac{geq}{dVm_{nb}} \\ \frac{geq}{dPg_{11}} & \dots & \frac{geq}{dPg_{1b}} & \frac{geq}{dPg_{11}} & \dots & \frac{geq}{dPg_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dPg_{n1}} & \dots & \frac{geq}{dPg_{nb}} & \frac{geq}{dPg_{n1}} & \dots & \frac{geq}{dPg_{nb}} \\ \frac{geq}{dQ_{g11}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{g1b}} & \frac{geq}{dQ_{g11}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{g1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dQ_{gn1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{gnb}} & \frac{geq}{dQ_{gn1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{gnb}} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

### 3.5.5 Pembentukan Matriks $g$ dan $dg$ Representasi dari *Inequality Constraint*

*Inequality constraint* dalam permasalahan *optimal power flow* direpresentasikan dalam bentuk matriks  $g$  dan  $dg$ , dimana kedua matriks tersebut disebut sebagai *power branch flow* yakni batasan aliran daya pada saluran yang meliputi *from bus limit* dan *to bus limit*. Misalnya dalam suatu sistem terdiri dari 3 bus ( $nb=3$ ) dan 2 generator ( $ng=2$ ). Maka bentuk dan ukuran matriks awal  $g$  dapat dilihat pada persamaan (3.23).

$$g = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Dimana  $F$  merupakan *from bus flow* dan  $T$  adalah *to bus flow*. Sedangkan untuk level beban dalam rentang waktu tertentu sebesar  $t$ , maka bentuk matriks  $g$  akan menjadi persamaan (3.24):

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ T_{11} \\ T_{21} \\ \vdots \\ F_{1t} \\ F_{2t} \\ T_{1t} \\ T_{2t} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{matrix} F_{11} \\ F_{21} \end{matrix}} \right\} \text{from bus jam ke-1} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} T_{11} \\ T_{21} \end{matrix}} \right\} \text{to bus jam ke-1} \\ \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} F_{1t} \\ F_{2t} \end{matrix}} \right\} \text{from bus jam ke-}t \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} T_{1t} \\ T_{2t} \end{matrix}} \right\} \text{to bus jam ke-}t \end{array} \quad (3.24)$$

Matriks  $dg$  adalah turunan dari  $g$ , bila nbr adalah jumlah saluran dalam suatu sistem, maka bentuk matriks  $dg$  dapat dilihat pada persamaan (3.28). Sedangkan untuk level beban dalam rentang waktu tertentu sebesar  $t$ , maka bentuk matriks  $dg$  akan menjadi sebagai berikut:

$$dg = \begin{bmatrix} dg_1 & \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} \\ \text{zeros} & dg_2 & \text{zeros} & \text{zeros} \\ \text{zeros} & \text{zeros} & \ddots & \text{zeros} \\ \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} & dg_t \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \text{Jam ke-1} \\ \rightarrow \text{Jam ke-2} \\ \\ \rightarrow \text{Jam ke-}t \end{array} \quad (3.25)$$

Dalam *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) pembentukan matriks yang menyatakan *ramp rate* yaitu perkalian matriks  $Af * x \leq bf$ . Untuk kasus level beban selama 2 jam, maka matriks  $Af$  dapat dinyatakan dalam persamaan (3.26).

$$Af = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Penambahan matriks untuk *ramp rate* dapat dituliskan pada matriks  $bf$  (persamaan 3.27).

$$bf = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \text{Jam ke-1} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{matrix}} \right\} \text{Ramp Up} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{matrix}} \right\} \text{Ramp Down} \\ \rightarrow \text{Jam ke-2} \end{array} \left. \vphantom{\begin{matrix} \left. \vphantom{\begin{matrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{matrix}} \right\} \text{Ramp Up} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{matrix}} \right\} \text{Ramp Down} \end{matrix}} \right\} \text{Kopling 1-2} \quad (3.27)$$

$$\begin{array}{cc}
\text{from branch flow} & \text{to branch flow}
\end{array}$$

$$dg = \begin{bmatrix} \frac{g}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{1(nbr)}} & \frac{g}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{1(nbr)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{d\theta_{n1}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{n(nbr)}} & \frac{g}{d\theta_{n1}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{n(nbr)}} \\ \frac{g}{dVm_{11}} & \cdots & \frac{g}{dVm_{1(nbr)}} & \frac{g}{dVm_{11}} & \cdots & \frac{g}{dVm_{1(nbr)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dVm_{n1}} & \cdots & \frac{g}{dVm_{n(nbr)}} & \frac{g}{dVm_{n1}} & \cdots & \frac{g}{dVm_{n(nbr)}} \\ \frac{g}{dPg_{11}} & \cdots & \frac{g}{dPg_{1(nbr)}} & \frac{g}{dPg_{11}} & \cdots & \frac{g}{dPg_{1(nbr)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dPg_{n1}} & \cdots & \frac{g}{dPg_{n(nbr)}} & \frac{g}{dPg_{n1}} & \cdots & \frac{g}{dPg_{n(nbr)}} \\ \frac{g}{dP_{Q11}} & \cdots & \frac{g}{dP_{Q1(nbr)}} & \frac{g}{dP_{Q11}} & \cdots & \frac{g}{dP_{Q1(nbr)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dP_{Qn1}} & \cdots & \frac{g}{dP_{Qn(nbr)}} & \frac{g}{dP_{Qn1}} & \cdots & \frac{g}{dP_{Qn(nbr)}} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

### 3.5.6 Pembentukan Vektor $lb$ dan $ub$ yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari Variabel yang dioptimasi

Variabel  $x$  merupakan variabel yang dioptimasi yang terdiri dari sudut tegangan, magnitude tegangan, daya aktif, dan daya reaktif.

$$lb \leq x \leq ub \quad (3.29)$$

Ukuran vektor  $lb$  dan  $ub$  adalah  $[2(nb+ng):1]$ , dengan  $ng$  adalah jumlah generator dan  $nb$  adalah jumlah bus, misalnya sistem dengan 2 generator ( $ng=2$ ) dan 3 bus ( $nb=3$ ). Maka batas atas dan batas bawah dari permasalahan *dynamic optimal power flow* tersebut masing-masing ditunjukkan pada persamaan (3.30) dan (3.31):

$$\mathbf{ub} = \begin{bmatrix} \theta_1 \max \\ \theta_2 \max \\ \theta_3 \max \\ v_{m1} \max \\ v_{m2} \max \\ v_{m3} \max \\ P_{g1} \max \\ P_{g2} \max \\ Q_{g1} \max \\ Q_{g2} \max \end{bmatrix} \quad \mathbf{lb} = \begin{bmatrix} \theta_1 \min \\ \theta_2 \min \\ \theta_3 \min \\ v_{m1} \min \\ v_{m2} \min \\ v_{m3} \min \\ P_{g1} \min \\ P_{g2} \min \\ Q_{g1} \min \\ Q_{g2} \min \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Sedangkan untuk level beban dalam rentang waktu tertentu sebesar  $t$ , maka bentuk matriks  $\mathbf{ub}$  dan  $\mathbf{lb}$  akan menjadi seperti persamaan (3.31).

$$\mathbf{ub} = \left[ \begin{array}{c} \theta_1 \max_1 \\ \theta_2 \max_1 \\ \theta_3 \max_1 \\ v_{m1} \max_1 \\ v_{m2} \max_1 \\ v_{m3} \max_1 \\ P_{g1} \max_1 \\ P_{g2} \max_1 \\ Q_{g1} \max_1 \\ Q_{g2} \max_1 \\ \vdots \\ \theta_1 \max_t \\ \theta_2 \max_t \\ \theta_3 \max_t \\ v_{m1} \max_t \\ v_{m2} \max_t \\ v_{m3} \max_t \\ P_{g1} \max_t \\ P_{g2} \max_t \\ Q_{g1} \max_t \\ Q_{g2} \max_t \end{array} \right] \quad \left. \begin{array}{c} \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \vdots \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \end{array} \right\} \quad \mathbf{lb} = \left[ \begin{array}{c} \theta_1 \min_1 \\ \theta_2 \min_1 \\ \theta_3 \min_1 \\ v_{m1} \min_1 \\ v_{m2} \min_1 \\ v_{m3} \min_1 \\ P_{g1} \min_1 \\ P_{g2} \min_1 \\ Q_{g1} \min_1 \\ Q_{g2} \min_1 \\ \vdots \\ \theta_1 \min_t \\ \theta_2 \min_t \\ \theta_3 \min_t \\ v_{m1} \min_t \\ v_{m2} \min_t \\ v_{m3} \min_t \\ P_{g1} \min_t \\ P_{g2} \min_t \\ Q_{g1} \min_t \\ Q_{g2} \min_t \end{array} \right] \quad \left. \begin{array}{c} \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \text{Jam ke-1} \\ \vdots \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \\ \text{Jam ke-}t \end{array} \right\} \quad (3.31)$$

### 3.5.7 Constraint Kapasitas ESS

Dalam menentukan kapasitas rating daya maksimum pada penyimpan energi ditentukan dari daya terbuang maksimal yang terjadi dalam jam tertentu, dan untuk menentukan kapasitas energi pada *Energy Storage System* (ESS) ditentukan dari jumlah energi terbuang dalam satu hari.

Pada saat kondisi *charging*, ESS dianggap sebagai beban, dan sebaliknya pada saat kondisi *discharging*, ESS dianggap sebagai generator. Batasan daya dari ESS pada saat kondisi *charging* dan *discharging* adalah sebagai berikut:

$$P_{ch} \leq P_i \quad (3.32)$$

$$P_{disch} \leq P_i \quad (3.33)$$

Dimana,  $P_{ch}$  adalah daya ESS pada saat *charging* (MW),  $P_{disch}$  adalah daya ESS pada saat *discharging* (MW), dan  $P_i$  merupakan rating daya ESS.

### 3.5.8 Energy Balance ESS

Besarnya energi pada saat proses *charging/discharging* ESS dihitung berdasarkan lama waktu dari masing-masing proses tersebut. Energi yang dikeluarkan pada saat perioda *on-peak* harus kurang dari atau sama dengan energi yang disimpan pada saat perioda *off-peak*. Selisih antara besarnya energi yang dikeluarkan dengan energi yang disimpan akan dianggap sebagai energi awal yang disimpan untuk hari berikutnya :

$$E_{ch} = E_{disch} \quad (3.34)$$

$$E_{ch} = \sum_{t=1}^{t_{ch}} P_{ch}^t \cdot t_k \quad (3.35)$$

$$E_{disch} = \sum_{t_{ch}}^{t_{disch}} P_{disch}^t \cdot t_k \quad (3.36)$$

Keterangan:

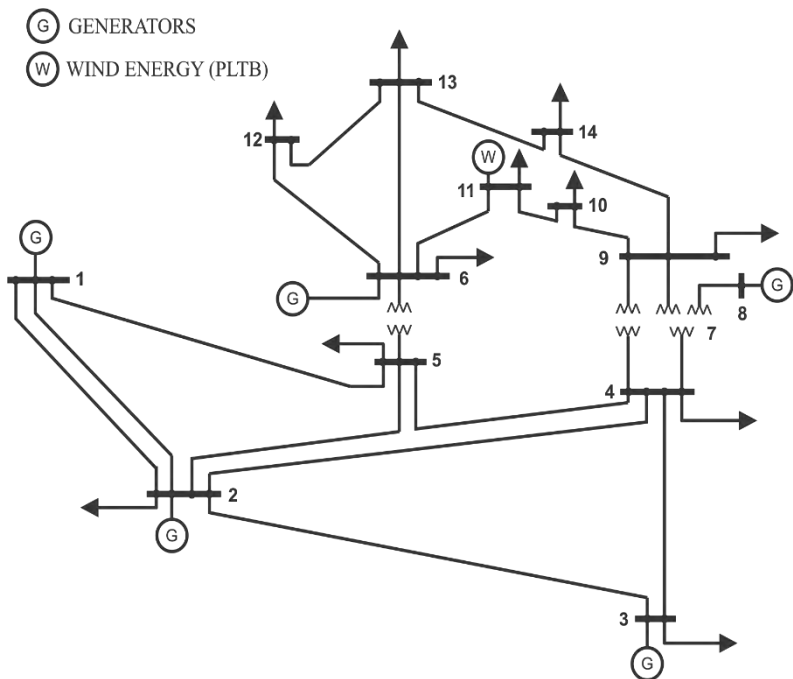
$E_{ch}$	: energi yang tersimpan di dalam ESS
$E_{disch}$	: energi yang dikeluarkan dari ESS
$E_{capacity}$	: kapasitas energi ESS
$P_{ch}$	: daya ESS pada saat <i>charging</i>
$P_{disch}$	: daya ESS pada saat <i>discharging</i>
$t_{ch}, t_{disch}$	: waktu <i>charging</i> dan <i>discharging</i>
$t_k$	: waktu konstan (1 jam)



## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Dalam bab ini, akan dibahas mengenai simulasi dan analisis tentang aliran daya optimal dinamis pada sistem IEEE 14 bus yang telah dimodifikasi. Sistem IEEE 14 bus merupakan bagian dari sistem kelistrikan *American Electric Power System* di Amerika Serikat. Sistem IEEE 14 bus terdiri dari 1 bus swing (*slack bus*), 4 bus pembangkit (*generator bus*), dan 9 bus beban (*load bus*). Salah satu dari bus tersebut ditambahkan atau diinjeksikan daya dari Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



**Gambar 4.1** *Single Line Diagram* IEEE 14 Bus Modifikasi

Pada sistem IEEE 14 bus ini, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) diletakkan di daerah yang memiliki potensi energi angin cukup

tinggi, namun dalam tugas akhir ini PLTB diletakkan pada bus dengan beban yang paling sedikit yakni bus 11. Selain dipasang PLTB, *Energy Storage System* (ESS) juga ditempatkan di bus 11. Hal ini dikarenakan ESS memiliki 2 fungsi, yaitu sebagai beban dan sebagai generator. ESS dapat berfungsi sebagai beban ketika menyerap daya atau energi listrik atau sering disebut sebagai proses *charging*. Sebaliknya, ketika memberi atau menjadi sumber energi listrik (proses *discharging*) ESS akan berfungsi sebagai generator.

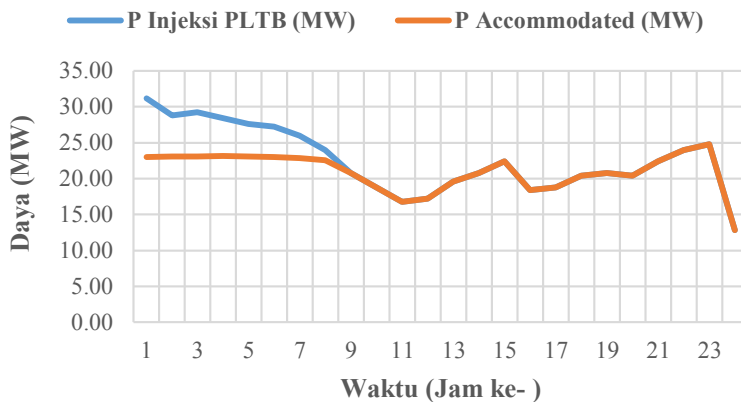
Daya aktif pembangkit PLTB yang akan diinjeksikan dalam sistem diambil dari sebuah paper IEEE “*Optimal Allocation of ESS in Distribution Systems With a High Penetration of Wind Energy*”[6]. Daya PLTB terdapat 24 buah yakni daya rata-rata setiap jam dalam satu hari pada musim semi (lihat lampiran 1). Daya di bus 11 yang diinjeksikan empat kali lebih besar dari daya PLTB (lampiran 1), hal ini diindikasikan bahwa empat kali lebih banyak turbin angin di bus tersebut. Sehingga daya aktif yang dibangkitkan oleh generator di bus 11 (PLTB) sebagai berikut:

**Tabel 4.1** Daya Pembangkitan PLTB di Bus 11

No	Jam ke -	P Potensi PLTB (MW)	P Injeksi PLTB (MW)
1	24 – 1	31.20	23.03
2	1 – 2	28.80	23.06
3	2 – 3	29.20	23.09
4	3 – 4	28.40	23.14
5	4 – 5	27.60	23.10
6	5 – 6	27.20	23.00
7	6 – 7	26.00	22.87
8	7 – 8	24.00	22.58
9	8 – 9	20.80	20.80
10	9 – 10	18.80	18.80
11	10 – 11	16.80	16.80
12	11 – 12	17.20	17.20
13	12 – 13	19.60	19.60
14	13 – 14	20.80	20.80
15	14 – 15	22.40	22.40
16	15 – 16	18.40	18.40
17	16 – 17	18.80	18.80
18	17 – 18	20.40	20.40

**Tabel 4.1** Daya Pembangkitan PLTB di Bus 11 (lanjutan)

No	Jam ke -	P Potensi PLTB (MW)	P Injeksi PLTB (MW)
19	18 – 19	20.80	20.80
20	19 – 20	20.40	20.40
21	20 – 21	22.40	22.40
22	21 – 22	24.00	24.00
23	22 – 23	24.80	24.80
24	23 – 24	12.80	12.80



**Gambar 4.2** Grafik Perbandingan P Potensi dan P Injeksi PLTB

P Potensi PLTB adalah daya aktif yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), sedangkan P Injeksi merupakan daya optimal PLTB yang dapat ditampung oleh sistem. Kondisi ini tidak semua daya yang diinjeksikan oleh PLTB dapat ditampung oleh sistem, karena sistem memiliki batasan-batasan seperti kapasitas saluran, tegangan maksimum dan minimum bus yang membatasi injeksi daya dari PLTB.

#### 4.1 Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi

Sistem IEEE 14 bus modifikasi yang memiliki 6 unit pembangkit dan akan digunakan 3 profil beban yang berbeda. Data yang digunakan untuk simulasi sistem IEEE 14 bus modifikasi dapat dilihat pada tabel 4.2:

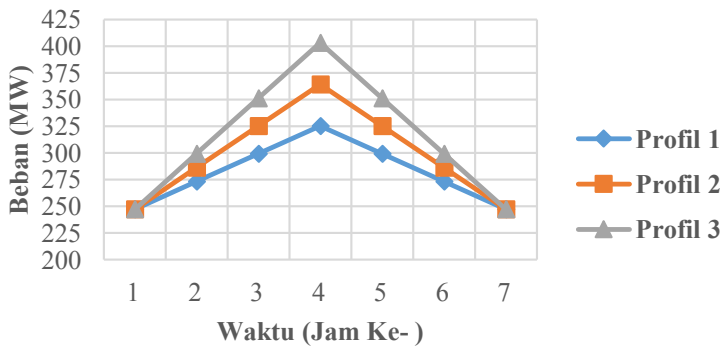
**Tabel 4.2** Data *Cost Function* Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi

Pembangkit	<i>Cost function</i> (R/MWh)	<i>Min</i> (MW)	<i>Max</i> (MW)	<i>Ramp rate</i> (MW/jam)
Unit 1	$0.0430293P_1^2 + 20P_1$	0	332.4	25
Unit 2	$0.25P_2^2 + 20P_2$	0	140	5
Unit 3	$0.01P_3^2 + 40P_3$	0	100	10
Unit 4	$0.01P_4^2 + 40P_4$	0	100	15
Unit 5	$0.01P_5^2 + 40P_5$	0	100	10
Unit 6	$0P_6^2 + 0P_6$	0	50	30

Dari tabel diatas, pembangkit unit 6 merupakan pembangkit listrik tenaga bayu yang merupakan sumber energi terbarukan dengan bahan bakar angin. Energi angin sudah tersedia di alam dengan jumlah yang tak terbatas setiap saat. sehingga tidak memerlukan biaya bahan bakar untuk membangkitkan pembangkit listrik tenaga angin. Oleh karena itu, pada Tabel 4.2 pembangkit unit 6 tidak memiliki *cost function* atau dianggap nol (gratis).

**Tabel 4.3** Data Profil Beban Sistem IEEE 14 Bus

Profil Beban	Beban (MW) Pada Jam ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Profil 1	247	273	299	325	299	273	247
Profil 2	247	286	325	364	325	286	247
Profil 3	247	299	351	403	351	299	247



**Gambar 4.3** Profil Beban Untuk Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi

Dari tabel 4.3 dapat dilihat beberapa perubahan pada profil beban berbeda. Profil beban 1 terdapat perubahan beban sebesar 26 MW/jam, profil beban 2 sebesar 39 MW/jam, dan profil beban 3 terdapat perubahan sebesar 52 MW/jam.

## 4.2 Simulasi *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) Pada Sistem IEEE 14 Bus

Pada simulasi ini akan digunakan sistem IEEE 14 bus modifikasi yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh *ramp rate* terhadap daya yang dibangkitkan dari tiap pembangkit dan total biaya pembangkitan.

### 4.2.1 Hasil Simulasi Untuk Profil Beban 1

Hasil perhitungan *dynamic optimal power flow* untuk sistem IEEE 14 bus dengan injeksi daya dari PLTB menggunakan *sequential quadratic programming* untuk profil beban 1 dapat dilihat pada tabel 4.4, 4.5, dan 4.6 Sebagai berikut:

**Tabel 4.4** Daya Pembangkitan DOPF Tanpa *Ramp rate* untuk Profil Beban 1

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	187.47	35.52	11.06	0.00	0.00	23.03	257.07
2	191.97	36.38	27.59	0.00	4.33	23.06	283.32
3	194.68	36.91	39.32	0.00	15.52	23.09	309.52
4	196.47	37.28	48.98	5.77	24.09	23.14	335.73
5	194.68	36.91	39.31	0.00	15.52	23.10	309.52
6	191.98	36.38	27.60	0.00	4.36	23.00	283.32
7	187.51	35.52	11.16	0.00	0.00	22.87	257.06

**Tabel 4.5** Daya Pembangkitan DOPF Dengan *Ramp rate* untuk Profil Beban 1

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	183.87	34.79	14.97	0.00	0.00	23.03	256.66
2	192.04	36.40	24.97	0.00	6.89	23.06	283.37
3	195.86	37.17	34.97	1.73	16.89	23.09	309.71
4	197.07	37.42	44.97	7.26	25.99	23.14	335.86
5	195.85	37.16	34.97	1.70	16.92	23.10	309.71

**Tabel 4.5** Daya Pembangkitan DOPF Dengan *Ramp rate* untuk Profil Beban 1 (lanjutan)

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
6	192.06	36.41	24.97	0.00	6.92	23.00	283.37
7	184.01	34.82	14.97	0.00	0.00	22.87	256.67

**Tabel 4.6** Biaya Total Pembangkitan Untuk Profil Beban 1

Pembangkitan	Biaya Total Pembangkitan (US\$)
Tanpa Ramprate	56501.65
Dengan Ramprate	56506.18

#### 4.2.2 Hasil Simulasi Untuk Profil Beban 2

Hasil perhitungan *dynamic optimal power flow* untuk sistem IEEE 14 bus dengan injeksi daya dari PLTB menggunakan *sequential quadratic programming* untuk profil beban 2 dapat dilihat pada tabel 4.7, 4.8, dan 4.9 sebagai berikut:

**Table 4.7** Daya Pembangkitan DOPF Tanpa *Ramp rate* untuk Profil Beban 2

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	187.46	35.52	11.06	0.00	0.00	23.03	257.07
2	193.33	36.65	33.45	0.00	9.93	23.06	296.42
3	196.48	37.28	48.99	5.79	24.11	23.09	335.73
4	198.95	37.80	63.05	15.91	36.23	23.14	375.09
5	196.48	37.28	48.98	5.78	24.10	23.10	335.73
6	193.33	36.65	33.47	0.00	9.96	23.00	296.42
7	187.51	35.52	11.16	0.00	0.00	22.87	257.06

**Tabel 4.8** Daya Pembangkitan DOPF Dengan *Ramp rate* Untuk Profil Beban 2

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	177.84	33.59	21.56	0.00	0.00	23.03	256.02
2	195.00	36.98	31.56	0.00	10.00	23.06	296.60
3	199.65	37.95	41.56	14.00	20.00	23.09	336.25
4	203.85	38.83	51.56	28.57	30.00	23.14	375.95

**Tabel 4.8** Daya Pembangkitan DOPF Dengan *Ramp rate* Untuk Profil Beban 2 (lanjutan)

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
5	199.63	37.95	41.56	14.00	20.00	23.10	336.25
6	195.05	36.99	31.56	0.00	10.00	23.00	296.61
7	177.98	33.62	21.56	0.00	0.00	22.87	256.03

**Tabel 4.9** Biaya Total Pembangkitan Untuk Profil Beban 2

Pembangkitan	Biaya Total Pembangkitan (US\$)
Tanpa Ramprate	61248.37
Dengan Ramprate	61280.48

#### 4.2.3 Hasil Simulasi Untuk Profil Beban 3

Hasil perhitungan *dynamic optimal power flow* untuk sistem IEEE 14 bus dengan injeksi daya dari PLTB menggunakan *sequential quadratic programming* untuk profil beban 3 dapat dilihat pada tabel 4.10, 4.11, dan 4.12 sebagai berikut:

**Tabel 4.10** Daya Pembangkitan DOPF Tanpa *Ramp rate* untuk Profil Beban 3

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	187.46	35.52	11.06	0.00	0.00	23.03	257.07
2	194.68	36.92	39.32	0.00	15.54	23.06	309.52
3	198.13	37.63	58.35	12.54	32.22	23.09	361.97
4	201.44	38.32	77.25	26.20	48.16	23.14	414.51
5	198.13	37.63	58.35	12.53	32.22	23.10	361.97
6	194.69	36.92	39.34	0.00	15.57	23.00	309.52
7	187.51	35.52	11.16	0.00	0.00	22.87	257.06

**Tabel 4.11** Daya Pembangkitan DOPF Dengan *Ramp rate* Untuk Profil Beban 3

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	170.86	32.21	27.49	0.00	1.74	23.03	255.33
2	189.90	36.00	37.49	11.03	11.74	23.06	309.22
3	205.58	39.16	47.49	26.03	21.74	23.09	363.09

**Tabel 4.11** Daya Pembangkitan DOPF Dengan *Ramp rate* Untuk Profil Beban 3 (lanjutan)

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
4	221.43	42.40	57.49	41.03	31.74	23.14	417.23
5	205.57	39.16	47.49	26.03	21.74	23.10	363.09
6	189.96	36.01	37.49	11.03	11.74	23.00	309.22
7	171.01	32.24	27.49	0.00	1.74	22.87	255.34

**Tabel 4.12** Biaya Total Pembangkitan Untuk Profil Beban 3

Pembangkitan	Biaya Total Pembangkitan (US\$)
Tanpa Ramprate	66021.50
Dengan Ramprate	66144.95

### 4.3 Analisis *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) Pada Sistem IEEE 14 Bus

#### 4.3.1 Analisis Untuk Profil Beban 1

Berdasarkan hasil simulasi (tabel 4.4) terlihat bahwa pembangkit unit 3 memiliki laju perubahan daya yang tidak terlalu besar tetapi sudah melanggar batas *ramp rate* yang sudah ditentukan sebesar 10 MW/jam. Berikut tabel perubahan laju daya pembangkitan pada setiap level beban untuk mengetahui pembangkit yang melanggar *ramp rate*.

**Tabel 4.13** Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Tanpa *Ramp rate* Untuk Profil Beban 1

Jam ke -	Perubahan Daya (MW)						Keterangan
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	
1 -- 2	4.50	0.87	16.53	0.00	4.33	0.03	Melanggar
2 -- 3	2.71	0.53	11.73	0.00	11.19	0.03	Melanggar
3 -- 4	1.80	0.37	9.66	5.77	8.57	0.05	Sesuai
4 -- 5	-1.80	-0.37	-9.67	-5.77	-8.57	-0.04	Sesuai
5 -- 6	-2.70	-0.53	-11.71	0.00	-11.16	-0.10	Melanggar
6 -- 7	-4.47	-0.86	-16.44	0.00	-4.36	-0.13	Melanggar

Dari tabel 4.13 pembangkit unit 3 telah melanggar batas *ramp rate* pada jam 1-2, 2-3, 5-6, dan 6-7 selain itu semua pembangkit mampu membangkitkan daya yang sesuai dengan batasan *ramp rate*. Hal ini dikarenakan adanya injeksi daya dari PLTB (unit 6) yang besarnya



berubah-ubah setiap jam. Sehingga unit lainnya dapat mengalami perubahan daya sesuai dengan permintaan beban.

Sedangkan dari hasil simulasi (tabel 4.6) terlihat bahwa semua pembangkit tidak ada yang melanggar (telah memenuhi) batas *ramp rate* yang telah ditentukan. Tabel 4.14 menunjukkan perubahan laju daya pembangkitan pada setiap level beban untuk mengetahui pembangkit yang melanggar *ramp rate*.

**Tabel 4.14** Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Dengan *Ramp rate* Untuk Profil Beban 1

Jam ke -	Perubahan Daya (MW)						Keterangan
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	
1 -- 2	8.17	1.61	10.00	0.00	6.89	0.03	Sesuai
2 -- 3	3.82	0.76	10.00	1.73	10.00	0.03	Sesuai
3 -- 4	1.21	0.25	10.00	5.54	9.10	0.05	Sesuai
4 -- 5	-1.22	-0.25	-10.00	-5.57	-9.07	-0.04	Sesuai
5 -- 6	-3.79	-0.75	-10.00	-1.70	-10.00	-0.10	Sesuai
6 -- 7	-8.06	-1.59	-10.00	0.00	-6.92	-0.13	Sesuai

Dari tabel 4.14 dapat dilihat bahwa unit 3 memiliki *ramp rate* yang maksimum sebesar 10 MW/jam (sesuai dengan ketentuan). Hal ini dikarenakan adanya perhitungan yang memperhatikan batasan *ramp rate*. Namun, biaya total pembangkitan pada DOPF dengan memperhatikan *ramp rate* memiliki nilai yang lebih besar daripada biaya total pembangkitan tanpa memperhatikan *ramp rate*. Adapun selisih biaya pembangkitan antara DOPF tanpa memperhatikan *ramp rate* dan dengan memperhatikan *ramp rate* sebesar US\$ 4.53.

#### 4.3.2 Analisis Untuk Profil Beban 2

Berdasarkan hasil simulasi (tabel 4.7) terlihat bahwa pembangkit unit 3 dan 5 memiliki laju perubahan daya yang tidak terlalu besar tetapi sudah melanggar batas *ramp rate* yang sudah ditentukan sebesar 10 MW/jam dan 10 MW/jam. Berikut tabel perubahan laju daya pembangkitan pada setiap level beban untuk mengetahui pembangkit yang melanggar *ramp rate*.

Dari tabel 4.15 pembangkit unit 3 dan 5 telah melanggar batas *ramp rate* di setiap jam akibat penambahan beban (menggunakan profil beban 2) yang lebih besar dari beban sebelumnya (profil beban 1) Selain itu semua pembangkit mampu membangkitkan daya yang sesuai dengan

batasan *ramp rate*. Hal ini dikarenakan adanya injeksi daya dari PLTB (unit 6) yang besarnya berubah-ubah setiap jam. Sehingga unit lainnya dapat mengalami perubahan daya sesuai dengan permintaan beban.

**Tabel 4.15** Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Tanpa *Ramp rate* untuk Profil Beban 2

Jam ke -	Perubahan Daya (MW)						Keterangan
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	
1 -- 2	5.86	1.13	22.39	0.00	9.93	0.03	Sesuai
2 -- 3	3.15	0.64	15.54	5.79	14.17	0.03	Melanggar
3 -- 4	2.48	0.52	14.07	10.12	12.13	0.05	Melanggar
4 -- 5	-2.48	-0.52	-14.07	-10.13	-12.13	-0.04	Melanggar
5 -- 6	-3.14	-0.63	-15.52	-5.78	-14.14	-0.10	Melanggar
6 -- 7	-5.83	-1.13	-22.30	0.00	-9.96	-0.13	Melanggar

Sedangkan dari hasil simulasi (tabel 4.8) terlihat bahwa semua pembangkit tidak ada yang melanggar (telah memenuhi) batas *ramp rate* yang telah ditentukan. Berikut tabel perubahan laju daya pembangkitan pada setiap level beban untuk mengetahui pembangkit yang melanggar *ramp rate*.

**Tabel 4.16** Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Dengan *Ramp rate* Untuk Profil Beban 2

Jam ke -	Perubahan Daya (MW)						Keterangan
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	
1 -- 2	17.16	3.40	10.00	0.00	10.00	0.03	Sesuai
2 -- 3	4.65	0.96	10.00	14.00	10.00	0.03	Sesuai
3 -- 4	4.20	0.88	10.00	14.57	10.00	0.05	Sesuai
4 -- 5	-4.22	-0.88	-10.00	-14.56	-10.00	-0.04	Sesuai
5 -- 6	-4.58	-0.95	-10.00	-14.00	-10.00	-0.10	Sesuai
6 -- 7	-17.08	-3.38	-10.00	0.00	-10.00	-0.13	Sesuai

Dari tabel 4.16 dapat dilihat bahwa unit 3 dan 5 memiliki *ramp rate* yang maksimum sebesar 10 MW/jam (sesuai dengan ketentuan). Hal ini dikarenakan adanya perubahan beban yang lebih besar (profil beban 2) dari sebelumnya (profil beban 1) dalam perhitungan yang memperhatikan batasan *ramp rate*. Namun, biaya total pembangkitan

pada DOPF dengan memperhatikan *ramp rate* memiliki nilai yang lebih besar daripada biaya total pembangkitan tanpa memperhatikan *ramp rate*. Adapun selisih biaya pembangkitan antara DOPF tanpa memperhatikan *ramp rate* dan dengan memperhatikan *ramp rate* sebesar US\$ **32.11**.

### 4.3.3 Analisis Untuk Profil Beban 3

Berdasarkan hasil simulasi (tabel 4.10) terlihat bahwa pembangkit unit 3 dan 5 masih memiliki laju perubahan daya yang tidak terlalu besar tetap sudah melanggar batas *ramp rate* yang sudah ditentukan sebesar 10 MW/jam dan 10 MW/jam. Berikut tabel perubahan laju daya pembangkitan pada setiap level beban untuk mengetahui pembangkit yang melanggar *ramp rate*.

**Tabel 4.17** Perubahan Daya Pembangkitan DOPF Tanpa *Ramp rate* Untuk Profil Beban 3

Jam ke -	Perubahan Daya (MW)						Keterangan
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	
1 -- 2	7.22	1.40	28.27	0.00	15.54	0.03	Melanggar
2 -- 3	3.45	0.71	19.03	12.54	16.69	0.03	Melanggar
3 -- 4	3.31	0.70	18.89	13.67	15.93	0.05	Melanggar
4 -- 5	-3.31	-0.70	-18.89	-13.67	-15.94	-0.04	Melanggar
5 -- 6	-3.44	-0.71	-19.01	-12.53	-16.65	-0.10	Melanggar
6 -- 7	-7.18	-1.39	-28.18	0.00	-15.57	-0.13	Melanggar

Dari tabel 4.17 pembangkit unit 3 dan 5 telah melanggar batas *ramp rate* di setiap jam akibat penambahan beban (menggunakan profil beban 3) yang lebih besar dari beban sebelumnya (profil beban 2) Selain itu semua pembangkit mampu membangkitkan daya yang sesuai dengan batasan *ramp rate*. Hal ini dikarenakan adanya injeksi daya dari PLTB (unit 6) yang besarnya berubah-ubah setiap jam. Sehingga unit lainnya dapat mengalami perubahan daya sesuai dengan permintaan beban.

Sedangkan dari simulasi (tabel 4.11) terlihat bahwa semua pembangkit tidak ada yang melanggar (telah memenuhi) batas *ramp rate* yang telah ditentukan. Berikut tabel perubahan laju daya pembangkitan pada setiap level beban untuk mengetahui pembangkit yang melanggar *ramp rate*.

Dari tabel 4.18 dapat dilihat bahwa unit 3, 4 dan 5 memiliki *ramp rate* yang maksimum sebesar 10 MW/jam, 15 MW/jam, dan 10 MW/jam (sesuai dengan ketentuan). Hal ini dikarenakan adanya perubahan beban

yang lebih besar (profil beban 3) dari sebelumnya (profil beban 2) dalam perhitungan yang memperhatikan batasan *ramp rate*.

**Tabel 4.18** Perubahan Daya Pembangkitan DOPF dengan *Ramp rate* Untuk Profil Beban 3

Jam ke -	Perubahan Daya (MW)						Keterangan
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	
1 -- 2	19.04	3.79	10.00	11.03	10.00	0.03	Sesuai
2 -- 3	15.67	3.17	10.00	15.00	10.00	0.03	Sesuai
3 -- 4	15.85	3.24	10.00	15.00	10.00	0.05	Sesuai
4 -- 5	-15.86	-3.24	-10.00	-15.00	-10.00	-0.04	Sesuai
5 -- 6	-15.61	-3.16	-10.00	-15.00	-10.00	-0.10	Sesuai
6 -- 7	-18.95	-3.77	-10.00	-11.03	-10.00	-0.13	Sesuai

Namun, biaya total pembangkitan pada DOPF dengan memperhatikan *ramp rate* memiliki nilai yang lebih besar daripada biaya total pembangkitan tanpa memperhatikan *ramp rate*. Adapun selisih biaya pembangkitan antara DOPF tanpa memperhatikan *ramp rate* dan dengan memperhatikan *ramp rate* sebesar US\$ **123.45**.

#### 4.4 Simulasi Sistem IEEE 14 Bus Dengan Profil Beban Dinamis

Pada simulasi ini akan digunakan sistem IEEE 14 bus mmodifikasi yang bertujuan untuk mengetahui biaya total pembangkitan dan daya pembangkitan di setiap unit tanpa dan dengan menggunakan *Energy Storage System* (ESS) ketika ada injeksi pembangkit listrik *renewable energy* (PLTB). Pada tahap ini, akan disimulasikan menggunakan profil beban dinamis dengan rentang waktu 24 jam.

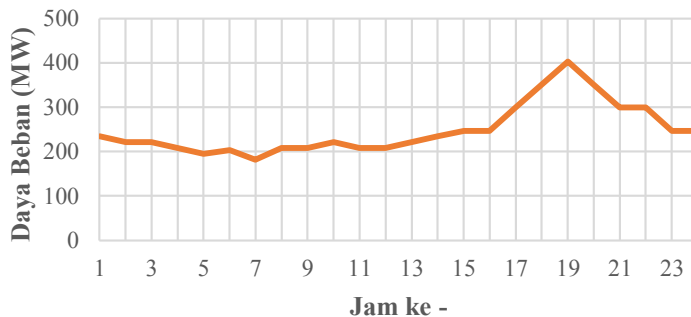
**Tabel 4.19** Data Profil Beban Dinamis Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi

Jam ke -	Daya Beban (MW)	Jam ke -	Daya Beban (MW)
1	234	9	208
2	221	10	221
3	221	11	208
4	208	12	208
5	195	13	221
6	202.8	14	234
7	182	15	247
8	208	16	247

**Tabel 4.19** Data Profil Beban Dinamis Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi (lanjutan)

Jam ke -	Daya Beban (MW)	Jam ke -	Daya Beban (MW)
17	299	21	299
18	351	22	299
19	403	23	247
20	351	24	247

Dari tabel 4.19, dapat dilihat beban puncak (*on peak*) terjadi pada jam 17.00 – 22.00, sedangkan untuk beban dasar (*off peak*) terjadi pada jam 23.00 – 16.00.



**Gambar 4.4** Profil Beban Dinamis Sistem IEEE 14 Bus Modifikasi

#### 4.4.1 Simulasi *Study Case 1*

Pada *study case 1*, besar daya injeksi dari PLTB yang digunakan adalah daya P Injeksi sesuai dengan tabel 4.1, dimana selisih antara P Potensi PLTB dan P Injeksi akan disimpan ke dalam ESS.

##### 4.4.1.1 Hasil Simulasi Tanpa Menggunakan ESS

Hasil perhitungan *dynamic optimal power flow* untuk sistem IEEE 14 bus dengan injeksi daya dari PLTB di bus nomor 11 dan tanpa menggunakan *Energy Storage System* (ESS) dengan profil beban dinamis pada *study case 1* dapat dilihat pada tabel 4.20.

**Tabel 4.20** Daya Pembangkitan DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	184.65	34.98	1.28	0.00	0.00	23.03	243.94
2	174.01	32.88	0.00	0.00	0.00	23.06	229.95
3	173.99	32.87	0.00	0.00	0.00	23.09	229.95
4	162.23	30.54	0.00	0.00	0.00	23.14	215.91
5	150.60	28.26	0.00	0.00	0.00	23.10	201.96
6	157.68	29.64	0.00	0.00	0.00	23.00	210.33
7	139.18	26.05	0.00	0.00	0.00	22.87	188.10
8	162.71	30.64	0.00	0.00	0.00	22.58	215.93
9	164.26	30.96	0.00	0.00	0.00	20.80	216.02
10	177.77	33.61	0.00	0.00	0.00	18.80	230.18
11	167.79	31.64	0.00	0.00	0.00	16.80	216.23
12	167.43	31.57	0.00	0.00	0.00	17.20	216.20
13	177.07	33.47	0.00	0.00	0.00	19.60	230.14
14	181.46	34.33	6.89	0.00	0.00	20.80	243.48
15	182.67	34.55	16.89	0.00	0.00	22.40	256.51
16	169.37	31.91	26.89	0.00	8.53	18.40	255.11
17	190.67	36.14	36.89	8.13	18.53	18.80	309.17
18	204.93	39.03	46.89	23.13	28.53	20.40	362.91
19	220.45	42.20	56.89	38.13	38.53	20.80	417.00
20	203.64	38.77	48.29	23.13	28.53	20.40	362.75
21	186.19	35.26	38.29	8.13	18.53	22.40	308.80
22	199.37	37.90	28.29	10.74	10.00	24.00	310.31
23	179.26	33.88	18.29	0.00	0.00	24.80	256.23
24	190.20	36.02	18.01	0.00	0.00	12.80	257.03

Tabel 4.20 menunjukkan daya yang dibangkitkan oleh masing-masing pembangkit tanpa menggunakan ESS. Dapat diketahui bahwa unit 6 merupakan unit Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang setiap jam mampu menghasilkan daya berubah-ubah akibat perubahan angin. Sedangkan unit lainnya merupakan unit pembangkit listrik yang memerlukan biaya bahan bakar untuk membangkitkannya seperti pada tabel 4.2. Sedangkan untuk mengetahui daya pembebanan di setiap unit, dapat dilihat pada tabel 4.21 sebagai berikut.

**Tabel 4.21** Daya Beban DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

Jam ke -	Daya (MW) Beban														
	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10	Bus 11	Bus 12	Bus 13	Bus 14	Total
1	0.00	19.53	84.78	43.02	6.84	10.08	0.00	0.00	26.55	8.10	3.15	6.39	12.15	13.41	234.00
2	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
3	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
4	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
5	0.00	16.28	70.65	35.85	5.70	8.40	0.00	0.00	22.13	6.75	2.63	5.33	10.13	11.18	195.00
6	0.00	16.93	73.48	37.28	5.93	8.74	0.00	0.00	23.01	7.02	2.73	5.54	10.53	11.62	202.80
7	0.00	15.19	65.94	33.46	5.32	7.84	0.00	0.00	20.65	6.30	2.45	4.97	9.45	10.43	182.00
8	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
9	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
10	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
11	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
12	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
13	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
14	0.00	19.53	84.78	43.02	6.84	10.08	0.00	0.00	26.55	8.10	3.15	6.39	12.15	13.41	234.00
15	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
16	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
17	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
18	0.00	29.30	127.17	64.53	10.26	15.12	0.00	0.00	39.83	12.15	4.73	9.59	18.23	20.12	351.00
19	0.00	33.64	146.01	74.09	11.78	17.36	0.00	0.00	45.73	13.95	5.43	11.01	20.93	23.10	403.00
20	0.00	29.30	127.17	64.53	10.26	15.12	0.00	0.00	39.83	12.15	4.73	9.59	18.23	20.12	351.00
21	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
22	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
23	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
24	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00

**Tabel 4.22** Total Biaya Pembangkitan Tanpa Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

Pembangkitan	Biaya Total Pembangkitan (US\$)
Tanpa ESS	165795.54

#### 4.4.1.2 Hasil Simulasi Dengan Menggunakan ESS

Hasil perhitungan *dynamic optimal power flow* untuk sistem IEEE 14 bus dengan injeksi daya dari PLTB dan menggunakan ESS untuk profil beban dinamis pada *study case 1* dapat dilihat pada tabel 4.23:

**Tabel 4.23** Daya Pembangkitan DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	186.83	35.38	6.80	0.00	0.00	23.03	252.03
2	179.09	33.87	0.00	0.00	0.00	23.06	236.01
3	179.39	33.92	0.00	0.00	0.00	23.09	236.40
4	166.83	31.45	0.00	0.00	0.00	23.14	221.43
5	154.54	29.02	0.00	0.00	0.00	23.10	206.65
6	161.36	30.35	0.00	0.00	0.00	23.00	214.72
7	141.90	26.57	0.00	0.00	0.00	22.87	191.34
8	163.94	30.90	0.00	0.00	0.00	22.58	217.42
9	163.82	30.87	0.00	0.00	0.00	21.30	215.99
10	176.89	33.44	0.00	0.00	0.00	19.80	230.13
11	166.46	31.38	0.00	0.00	0.00	18.30	216.14
12	166.11	31.31	0.00	0.00	0.00	18.70	216.12
13	176.18	33.30	0.00	0.00	0.00	20.60	230.08
14	181.53	34.35	5.85	0.00	0.00	21.80	243.53
15	181.85	34.40	15.85	0.00	0.00	24.40	256.50
16	169.12	31.87	25.85	0.00	6.92	21.40	255.16
17	190.78	36.17	35.85	6.24	16.92	23.30	309.26
18	204.15	38.88	45.85	21.24	26.92	25.90	362.95
19	219.64	42.05	55.85	36.24	36.92	26.33	417.03
20	202.10	38.47	48.07	21.24	26.92	25.90	362.70
21	187.77	35.57	38.07	6.24	16.92	24.40	308.97
22	199.23	37.87	28.07	10.14	10.00	25.00	310.31
23	179.03	33.84	18.07	0.00	0.00	25.30	256.23
24	189.53	35.89	16.30	0.00	0.00	15.30	257.02



**Tabel 4.24** Daya Beban DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

Jam ke -	Daya (MW) Beban														
	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10	Bus 11	Bus 12	Bus 13	Bus 14	Total
1	0.00	19.53	84.78	43.02	6.84	10.08	0.00	0.00	26.55	8.10	11.32	6.39	12.15	13.41	242.17
2	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	8.72	6.04	11.48	12.67	226.74
3	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	9.09	6.04	11.48	12.67	227.11
4	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	8.06	5.68	10.80	11.92	213.26
5	0.00	16.28	70.65	35.85	5.70	8.40	0.00	0.00	22.13	6.75	7.13	5.33	10.13	11.18	199.50
6	0.00	16.93	73.48	37.28	5.93	8.74	0.00	0.00	23.01	7.02	6.93	5.54	10.53	11.62	207.00
7	0.00	15.19	65.94	33.46	5.32	7.84	0.00	0.00	20.65	6.30	5.58	4.97	9.45	10.43	185.13
8	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	4.22	5.68	10.80	11.92	209.42
9	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
10	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
11	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
12	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
13	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
14	0.00	19.53	84.78	43.02	6.84	10.08	0.00	0.00	26.55	8.10	3.15	6.39	12.15	13.41	234.00
15	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
16	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
17	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
18	0.00	29.30	127.17	64.53	10.26	15.12	0.00	0.00	39.83	12.15	4.73	9.59	18.23	20.12	351.00
19	0.00	33.64	146.01	74.09	11.78	17.36	0.00	0.00	45.73	13.95	5.43	11.01	20.93	23.10	403.00
20	0.00	29.30	127.17	64.53	10.26	15.12	0.00	0.00	39.83	12.15	4.73	9.59	18.23	20.12	351.00
21	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
22	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
23	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
24	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00

**Tabel 4.25** Total Biaya Pembangkitan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

Pembangkitan	Biaya Total Pembangkitan (US\$)
Dengan ESS	165690.55

#### 4.4.2 Simulasi *Study Case 2*

Pada *study case 2*, besar daya injeksi dari PLTB yang digunakan adalah daya P Potensi PLTB yang sesuai dengan tabel 4.1, sedangkan daya yang akan disimpan ke dalam ESS merupakan daya dari sistem sebesar 10 MW tiap jam.

##### 4.4.2.1 Hasil Simulasi Tanpa Menggunakan ESS

Hasil perhitungan *dynamic optimal power flow* untuk sistem IEEE 14 bus dengan injeksi daya dari PLTB tanpa menggunakan *Energy Storage System* (ESS) dengan profil beban dinamis pada *study case 2* dapat dilihat pada tabel 4.26, sebagai berikut ini:

**Tabel 4.26** Daya Pembangkitan DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						Total
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	
1	178.65	33.81	0.00	0.00	0.00	31.20	243.67
2	168.98	31.90	0.00	0.00	0.00	28.80	229.68
3	168.63	31.84	0.00	0.00	0.00	29.20	229.67
4	157.65	29.65	0.00	0.00	0.00	28.40	215.70
5	146.69	27.51	0.00	0.00	0.00	27.60	201.80
6	154.02	28.94	0.00	0.00	0.00	27.20	210.16
7	136.50	25.50	0.00	0.00	0.00	26.00	188.00
8	161.45	30.42	0.00	0.00	0.00	24.00	215.87
9	164.26	30.96	0.00	0.00	0.00	20.80	216.02
10	177.77	33.61	0.00	0.00	0.00	18.80	230.18
11	167.79	31.64	0.00	0.00	0.00	16.80	216.23
12	167.43	31.57	0.00	0.00	0.00	17.20	216.20
13	177.06	33.47	0.00	0.00	0.00	19.60	230.14
14	181.46	34.33	6.89	0.00	0.00	20.80	243.48
15	182.67	34.55	16.89	0.00	0.00	22.40	256.51
16	169.38	31.92	26.89	0.00	8.53	18.40	255.11
17	190.67	36.14	36.89	8.13	18.53	18.80	309.17

**Tabel 4.26** Daya Pembangkitan DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada *Study Case 2* (lanjutan)

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
18	204.93	39.03	46.89	23.13	28.53	20.40	362.91
19	220.46	42.20	56.89	38.13	38.53	20.80	417.00
20	203.64	38.77	48.29	23.13	28.53	20.40	362.75
21	186.19	35.26	38.29	8.13	18.53	22.40	308.80
22	199.37	37.90	28.29	10.74	10.00	24.00	310.31
23	179.26	33.88	18.29	0.00	0.00	24.80	256.23
24	190.20	36.02	18.00	0.00	0.01	12.80	257.03

Tabel 4.26 menunjukkan daya yang dibangkitkan oleh masing-masing pembangkit tanpa menggunakan ESS. Dapat diketahui bahwa unit 6 merupakan unit PLTB yang setiap jam mampu menghasilkan daya berubah-ubah akibat perubahan angin (sesuai tabel 4.1). Sedangkan untuk besar daya beban di setiap bus dapat dilihat pada tabel 4.30.

**Tabel 4.27** Total Biaya Pembangkitan Tanpa Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Pembangkitan	Biaya Total Pembangkitan (US\$)
Tanpa ESS	164413.3

#### 4.4.2.2 Hasil Simulasi Dengan Menggunakan ESS

Hasil perhitungan *dynamic optimal power flow* untuk sistem IEEE 14 bus dengan injeksi daya dari PLTB dan menggunakan ESS untuk profil beban dinamis pada *study case 2* dapat dilihat pada tabel 4.28:

**Tabel 4.28** Daya Pembangkitan DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
1	185.14	35.07	2.51	0.00	0.00	31.20	253.91
2	177.77	33.61	0.00	0.00	0.00	28.80	240.18
3	177.42	33.54	0.00	0.00	0.00	29.20	240.16
4	166.37	31.37	0.00	0.00	0.00	28.40	226.14
5	155.41	29.18	0.00	0.00	0.00	27.60	212.20

**Tabel 4.28** Daya Pembangkitan DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 2* (lanjutan)

Jam ke -	Daya (MW) Pembangkitan						
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Total
6	162.75	30.65	0.00	0.00	0.00	27.20	220.60
7	145.20	27.16	0.00	0.00	0.00	26.00	198.37
8	170.20	32.16	0.02	0.00	0.00	24.00	226.38
9	160.89	30.27	0.00	0.00	0.00	24.68	215.84
10	174.14	32.90	0.00	0.00	0.00	22.92	229.96
11	164.36	30.98	0.00	0.00	0.00	20.68	216.02
12	164.01	30.91	0.00	0.00	0.00	21.08	216.00
13	173.43	32.77	0.00	0.00	0.00	23.72	229.92
14	179.63	33.98	4.70	0.00	0.00	25.16	243.47
15	180.61	34.16	14.70	0.00	0.00	27.01	256.47
16	168.90	31.83	24.70	0.00	6.75	23.01	255.19
17	191.23	36.26	34.70	6.02	16.75	24.38	309.34
18	204.64	38.98	44.70	21.02	26.75	26.95	363.04
19	219.30	41.98	54.70	36.02	36.75	28.32	417.07
20	203.10	38.67	46.36	21.02	26.75	26.95	362.85
21	186.52	35.33	36.36	6.02	16.75	27.98	308.97
22	198.78	37.79	26.36	7.88	10.00	29.58	310.39
23	176.97	33.45	16.36	0.00	0.00	29.41	256.19
24	188.96	35.79	14.86	0.00	0.00	17.41	257.02

Tabel 4.28 menunjukkan daya yang dibangkitkan oleh masing-masing pembangkit tanpa menggunakan ESS. Dapat diketahui bahwa total pembangkitan pada jam 1 sampai 8 lebih besar dari pada tanpa menggunakan ESS. Hal ini dikarenakan adanya penambahan beban (*charging*) pada ESS sebesar 10 MW. Sehingga daya yang dibangkitkan oleh generator akan bertambah seiring dengan bertambahnya beban. Sedangkan untuk mengetahui besar daya beban di setiap bus dapat dilihat pada tabel 4.31.

**Tabel 4.29** Total Biaya Pembangkitan Tanpa Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Pembangkitan	Biaya Total Pembangkitan (US\$)
Tanpa ESS	164193.51

**Tabel 4.30** Daya Beban DOPF Tanpa Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Jam ke -	Daya (MW) Beban														
	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10	Bus 11	Bus 12	Bus 13	Bus 14	Total
1	0.00	19.53	84.78	43.02	6.84	10.08	0.00	0.00	26.55	8.10	3.15	6.39	12.15	13.41	234.00
2	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
3	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
4	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
5	0.00	16.28	70.65	35.85	5.70	8.40	0.00	0.00	22.13	6.75	2.63	5.33	10.13	11.18	195.00
6	0.00	16.93	73.48	37.28	5.93	8.74	0.00	0.00	23.01	7.02	2.73	5.54	10.53	11.62	202.80
7	0.00	15.19	65.94	33.46	5.32	7.84	0.00	0.00	20.65	6.30	2.45	4.97	9.45	10.43	182.00
8	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
9	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
10	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
11	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
12	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
13	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
14	0.00	19.53	84.78	43.02	6.84	10.08	0.00	0.00	26.55	8.10	3.15	6.39	12.15	13.41	234.00
15	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
16	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
17	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
18	0.00	29.30	127.17	64.53	10.26	15.12	0.00	0.00	39.83	12.15	4.73	9.59	18.23	20.12	351.00
19	0.00	33.64	146.01	74.09	11.78	17.36	0.00	0.00	45.73	13.95	5.43	11.01	20.93	23.10	403.00
20	0.00	29.30	127.17	64.53	10.26	15.12	0.00	0.00	39.83	12.15	4.73	9.59	18.23	20.12	351.00
21	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
22	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
23	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
24	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00

**Tabel 4.31** Daya Beban DOPF Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Jam ke -	Daya (MW) Beban														
	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10	Bus 11	Bus 12	Bus 13	Bus 14	Total
1	0.00	19.53	84.78	43.02	6.84	10.08	0.00	0.00	26.55	8.10	13.15	6.39	12.15	13.41	244.00
2	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	12.98	6.04	11.48	12.67	231.00
3	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	12.98	6.04	11.48	12.67	231.00
4	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	12.80	5.68	10.80	11.92	218.00
5	0.00	16.28	70.65	35.85	5.70	8.40	0.00	0.00	22.13	6.75	12.63	5.33	10.13	11.18	205.00
6	0.00	16.93	73.48	37.28	5.93	8.74	0.00	0.00	23.01	7.02	12.73	5.54	10.53	11.62	212.80
7	0.00	15.19	65.94	33.46	5.32	7.84	0.00	0.00	20.65	6.30	12.45	4.97	9.45	10.43	192.00
8	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	12.80	5.68	10.80	11.92	218.00
9	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
10	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
11	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
12	0.00	17.36	75.36	38.24	6.08	8.96	0.00	0.00	23.60	7.20	2.80	5.68	10.80	11.92	208.00
13	0.00	18.45	80.07	40.63	6.46	9.52	0.00	0.00	25.08	7.65	2.98	6.04	11.48	12.67	221.00
14	0.00	19.53	84.78	43.02	6.84	10.08	0.00	0.00	26.55	8.10	3.15	6.39	12.15	13.41	234.00
15	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
16	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
17	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
18	0.00	29.30	127.17	64.53	10.26	15.12	0.00	0.00	39.83	12.15	4.73	9.59	18.23	20.12	351.00
19	0.00	33.64	146.01	74.09	11.78	17.36	0.00	0.00	45.73	13.95	5.43	11.01	20.93	23.10	403.00
20	0.00	29.30	127.17	64.53	10.26	15.12	0.00	0.00	39.83	12.15	4.73	9.59	18.23	20.12	351.00
21	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
22	0.00	24.96	108.33	54.97	8.74	12.88	0.00	0.00	33.93	10.35	4.03	8.17	15.53	17.14	299.00
23	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00
24	0.00	20.62	89.49	45.41	7.22	10.64	0.00	0.00	28.03	8.55	3.33	6.75	12.83	14.16	247.00

## 4.5 Analisis Sistem IEEE 14 Bus Dengan Profil Dinamis

### 4.5.1 Analisis *Study Case 1*

#### 4.5.1.1 Analisis Tanpa Menggunakan ESS

Berdasarkan tabel 4.20 daya yang dibangkitkan oleh unit 6 (PLTB) masih sama dengan daya yang diinjeksikan pada tabel 4.1, dimana pada tabel 4.1 terdapat daya yang tak terpakai pada jam 1 sampai 8. Sedangkan pada jam 9 – 24 daya yang dibangkitkan memiliki nilai yang sama besar. Nilai dan besar daya yang tak terpakai dapat dilihat pada tabel 4.32 berikut ini:

**Tabel 4.32** Daya Tak Terpakai Pada Sistem IEEE 14 Bus *Study Case 1*

Jam ke-	Daya Tak Terpakai (MW)
1	8.17
2	5.74
3	6.11
4	5.26
5	4.50
6	4.20
7	3.13
8	1.42
<b>Total</b>	<b>38.53</b>

Sehingga, pada tabel 4.21 besar daya beban sesuai dengan profil beban dinamis. Walaupun besar beban disetiap jam lebih kecil dari pada daya yang dibangkitkan, hal ini dikarenakan adanya rugi-rugi saluran. Namun, dalam tugas akhir ini, rugi-rugi saluran tidak diperhitungkan. Sehingga dapat dikatakan  $P_G = P_D$  (dimana  $P_G$  adalah daya pembangkitan dan  $P_D$  adalah daya beban) sesuai dengan rumus *energy balance*.

#### 4.5.1.2 Analisis Dengan Menggunakan ESS

Berdasarkan tabel 4.23 daya yang dibangkitkan oleh unit 6 (PLTB) mengalami perubahan pada jam 9 sampai 24. Hal ini dikarenakan adanya penambahan *Energy Storage System* (ESS) yang terletak di satu bus dengan PLTB yakni di bus nomer 11. Dari tabel 4.24 dapat diketahui bahwa pada jam 1 – 8, ESS dalam kondisi *charging*, hal ini dapat dibuktikan dengan adanya penambahan daya beban di bus nomer 11. Penambahan beban tersebut diperoleh dari besar daya yang tak terpakai.

Sedangkan ESS akan mengalami proses *discharging* ketika jam 9 – 24, hal ini dapat diketahui dari tabel 4.23, dimana unit 6 pada jam tersebut menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan simulasi tanpa menggunakan ESS. Adapun besar daya yang dibangkitkan dari ESS dapat dilihat pada tabel 4.33 sebagai berikut:

**Tabel 4.33** Besar Daya Pembangkitan Dari ESS Pada *Study Case 1*

Jam ke-	Daya Pembangkitan (MW)
9	0.50
10	1.00
11	1.50
12	1.50
13	1.00
14	1.00
15	2.00
16	3.00
17	4.50
18	5.50
19	5.53
20	5.50
21	2.00
22	1.00
23	0.50
24	2.50
<b>Total</b>	<b>38.53</b>

Dari tabel 4.33 dapat diketahui bahwa besar daya yang dikeluarkan oleh ESS paling besar terjadi pada jam 19 yakni 5.53 MW. Hal ini dikarenakan pada profil dinamis, beban puncak (*on-peak*) terjadi pada jam 19. Namun, besar daya total yang dikeluarkan oleh ESS sama dengan besar daya total yang di simpan oleh ESS, yaitu sebesar 38.53 MW. Sehingga dengan menggunakan rumus persamaan 3.34 sampai 3.36 dapat diperoleh kapasitas ESS sebesar 38.53 MW.



#### 4.5.1.3 Analisis Perbandingan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS

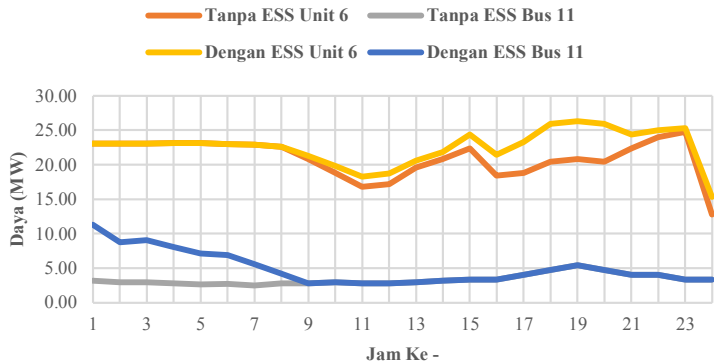
Dari kedua simulasi (tanpa dan dengan menggunakan ESS) dapat dibandingkan daya pembangkitan di unit 6 (PLTB) dan beban di bus 11 pada tabel 4.34 sebagai berikut:

**Tabel 4.34** Perbandingan Daya Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

Jam ke	Tanpa ESS		Dengan ESS		Selisih	
	Unit 6	Bus 11	Unit 6	Bus 11	Unit 6	Bus 11
1	23.03	3.15	23.03	11.32	0.00	8.17
2	23.06	2.98	23.06	8.72	0.00	5.74
3	23.09	2.98	23.09	9.09	0.00	6.11
4	23.14	2.80	23.14	8.06	0.00	5.26
5	23.10	2.63	23.10	7.13	0.00	4.50
6	23.00	2.73	23.00	6.93	0.00	4.20
7	22.87	2.45	22.87	5.58	0.00	3.13
8	22.58	2.80	22.58	4.22	0.00	1.42
9	20.80	2.80	21.30	2.80	0.50	0.00
10	18.80	2.98	19.80	2.98	1.00	0.00
11	16.80	2.80	18.30	2.80	1.50	0.00
12	17.20	2.80	18.70	2.80	1.50	0.00
13	19.60	2.98	20.60	2.98	1.00	0.00
14	20.80	3.15	21.80	3.15	1.00	0.00
15	22.40	3.33	24.40	3.33	2.00	0.00
16	18.40	3.33	21.40	3.33	3.00	0.00
17	18.80	4.03	23.30	4.03	4.50	0.00
18	20.40	4.73	25.90	4.73	5.50	0.00
19	20.80	5.43	26.33	5.43	5.53	0.00
20	20.40	4.73	25.90	4.73	5.50	0.00
21	22.40	4.03	24.40	4.03	2.00	0.00
22	24.00	4.03	25.00	4.03	1.00	0.00
23	24.80	3.33	25.30	3.33	0.50	0.00
24	12.80	3.33	15.30	3.33	2.50	0.00
<b>Total</b>	<b>503.07</b>	<b>80.26</b>	<b>541.60</b>	<b>118.79</b>	<b>38.53</b>	<b>38.53</b>

Dari tabel 4.34 dapat diketahui bahwa total daya pembangkitan ketika menggunakan ESS lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan

ESS. Hal ini dikarenakan daya yang tak terpakai dapat disimpan pada ESS dan dikeluarkan pada saat sistem mengalami beban puncak.



**Gambar 4.5** Grafik Perbandingan Daya Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

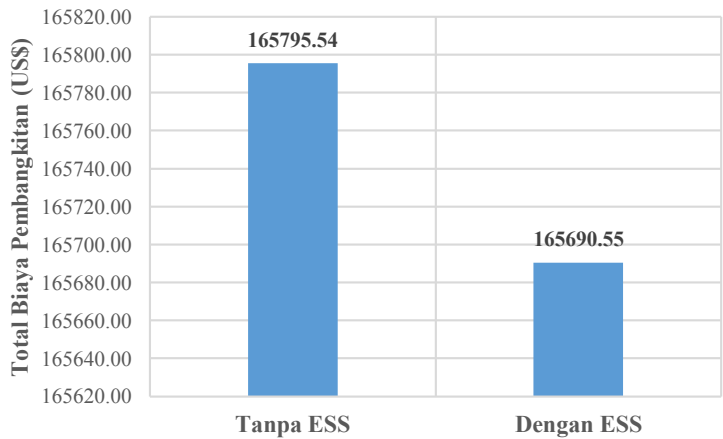
Selain itu, total biaya pembangkitan dengan menggunakan ESS lebih murah dibandingkan tanpa menggunakan ESS, hal ini dapat dilihat pada tabel 4.35 berikut ini:

**Tabel 4.35** Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Tanpa Dan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

Total Biaya Pembangkitan (US\$)	
Tanpa ESS	Dengan ESS
165795.54	165690.55

Berdasarkan tabel 4.35 total biaya pembangkitan dengan menggunakan ESS dan tanpa menggunakan ESS memiliki selisih sebesar US\$ **104.9**. Hal ini dikarenakan total pembangkitan dengan menggunakan ESS lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan ESS. Sedangkan dalam sistem, pembangkitan unit 6 (PLTB) memiliki biaya bahan bakar yang gratis sehingga dengan injeksi daya dari PLTB yang semakin besar maka akan mempengaruhi pembangkitan dari unit lainnya. Dengan kata lain, dalam sistem jika ada pembangkitan yang memiliki biaya bahan bakar gratis maka daya yang yang dibangkitkan oleh pembangkitan tersebut akan di injeksikan semaksimal mungkin agar tidak ada ada daya

yang tak terpakai. Karena dengan adanya injeksi daya yang gratis ini, maka pembangkitan untuk unit lainnya yang memerlukan biaya untuk bahan bakar dapat dibangkitkan seminimal mungkin. Dengan tujuan dapat memperoleh total biaya pembangkitan yang minimum.



**Gambar 4.6** Diagram Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 1*

**4.5.2 Analisis Study Case 2**

**4.5.2.1 Analisis Tanpa Menggunakan ESS**

Berdasarkan tabel 4.26, pada jam 1 sampai 8 daya yang dibangkitkan oleh pembangkit unit 6 (PLTB) lebih besar dibandingkan pada *study case 1*, sehingga besar daya pembangkitan unit lainnya mengalami perubahan lebih kecil. Namun, besar daya total pembangkitan ini tetap lebih besar dibandingkan dengan besar daya total permintaan beban (dapat dilihat pada tabel 4.30). Sedangkan pada jam 9 sampai 24, daya yang dibangkitkan oleh pembangkit unit 6 (PLTB) masih sama dengan *study case 1*. Hal ini sesuai dengan data P Injeksi dari PLTB pada tabel 4.1

**4.5.2.2 Analisis Dengan Menggunakan ESS**

Berdasarkan tabel 4.28, daya yang dibangkitkan oleh pembangkit unit 6 masih sama besarnya dengan tanpa menggunakan ESS pada *study case 2*. Namun, berbeda dengan daya yang dibangkitkan oleh unit

pembangkit lainnya. Pada jam 1 sampai 8, daya yang dibangkitkan oleh pembangkit selain unit 6 lebih besar dari tanpa menggunakan ESS. Hal ini dikarenakan adanya penambahan ESS yang berfungsi sebagai beban (*charging*) pada jam tersebut. Adapun besar daya yang disimpan oleh ESS dari sistem dapat dilihat pada tabel 4.31 di bus nomer 11.

Sedangkan pada jam 9 sampai 24, ESS akan mengalami proses discharging, hal ini dapat diketahui dari tabel 4.28 dimana pembangkit unit 6 (PLTB) membangkitkan daya yang lebih besar dari yang sebelumnya (tanpa menggunakan ESS). Adapun besar daya yang dibangkitkan oleh ESS dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

**Tabel 4.36** Besar Daya Pembangkitan Dari ESS Pada *Study Case 2*

Jam ke	Daya Pembangkitan (MW)
9	3.88
10	4.12
11	3.88
12	3.88
13	4.12
14	4.36
15	4.61
16	4.61
17	5.58
18	6.55
19	7.52
20	6.55
21	5.58
22	5.58
23	4.61
24	4.61
<b>Total</b>	<b>80.00</b>

Dari tabel 4.36 dapat diketahui bahwa besar daya yang dikeluarkan oleh ESS paling besar terjadi pada jam 19 yakni 7.52 MW. Hal ini dikarenakan pada profil dinamis, beban puncak (*on-peak*) terjadi pada jam 19. Namun, besar daya total yang dikeluarkan oleh ESS sama dengan besar daya total yang di simpan oleh ESS, yaitu sebesar 80.00 MW. Sehingga dengan menggunakan rumus persamaan 3.34 sampai 3.36 dapat diperoleh kapasitas ESS sebesar 80.00 MW.

#### 4.5.2.3 Analisis Perbandingan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS

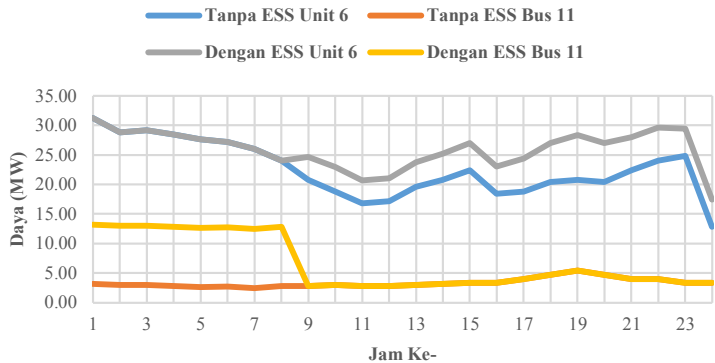
Dari kedua simulasi (tanpa dan dengan menggunakan ESS) dapat dibandingkan daya pembangkitan di unit 6 (PLTB) dan beban di bus 11 pada tabel 4.37 sebagai berikut:

**Tabel 4.37** Perbandingan Daya Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Jam ke	Tanpa ESS		Dengan ESS		Selisih	
	Unit 6	Bus 11	Unit 6	Bus 11	Unit 6	Bus 11
1	31.20	3.15	31.20	13.15	0.00	10.00
2	28.80	2.98	28.80	12.98	0.00	10.00
3	29.20	2.98	29.20	12.98	0.00	10.00
4	28.40	2.80	28.40	12.80	0.00	10.00
5	27.60	2.63	27.60	12.63	0.00	10.00
6	27.20	2.73	27.20	12.73	0.00	10.00
7	26.00	2.45	26.00	12.45	0.00	10.00
8	24.00	2.80	24.00	12.80	0.00	10.00
9	20.80	2.80	24.68	2.80	3.88	0.00
10	18.80	2.98	22.92	2.98	4.12	0.00
11	16.80	2.80	20.68	2.80	3.88	0.00
12	17.20	2.80	21.08	2.80	3.88	0.00
13	19.60	2.98	23.72	2.98	4.12	0.00
14	20.80	3.15	25.16	3.15	4.36	0.00
15	22.40	3.33	27.01	3.33	4.61	0.00
16	18.40	3.33	23.01	3.33	4.61	0.00
17	18.80	4.03	24.38	4.03	5.58	0.00
18	20.40	4.73	26.95	4.73	6.55	0.00
19	20.80	5.43	28.32	5.43	7.52	0.00
20	20.40	4.73	26.95	4.73	6.55	0.00
21	22.40	4.03	27.98	4.03	5.58	0.00
22	24.00	4.03	29.58	4.03	5.58	0.00
23	24.80	3.33	29.41	3.33	4.61	0.00
24	12.80	3.33	17.41	3.33	4.61	0.00
<b>Total</b>	<b>541.60</b>	<b>80.26</b>	<b>621.64</b>	<b>160.26</b>	<b>80.00</b>	<b>80.00</b>

Dari tabel 4.37 dapat diketahui bahwa total daya pembangkitan ketika menggunakan ESS lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan

ESS. Hal ini dikarenakan adanya daya yang disimpan oleh ESS dan dikeluarkan pada saat sistem mengalami beban puncak.



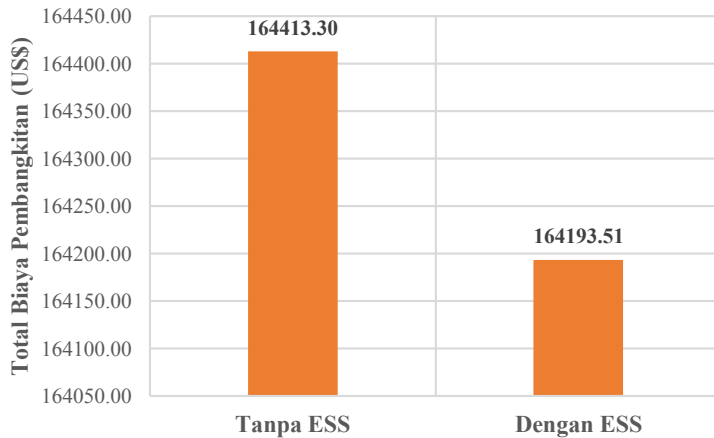
**Gambar 4.7** Grafik Perbandingan Daya Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Selain itu, total biaya pembangkitan dengan menggunakan ESS lebih murah dibandingkan tanpa menggunakan ESS, hal ini dapat dilihat pada tabel 4.38 berikut ini:

**Tabel 4.38** Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Tanpa Dan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

Total Biaya Pembangkitan (US\$)	
Tanpa ESS	Dengan ESS
164413.3	164193.51

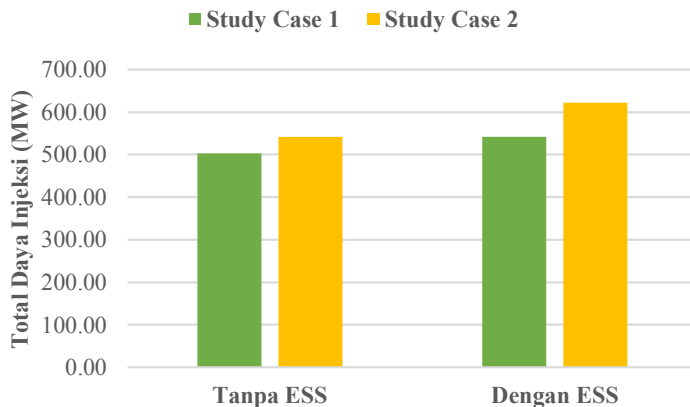
Berdasarkan tabel 4.38 total biaya pembangkitan dengan menggunakan ESS dan tanpa menggunakan ESS memiliki selisih sebesar US\$ **219.79**. Hal ini dikarenakan total pembangkitan dengan menggunakan ESS lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan ESS. Dan untuk pembangkitan dari ESS tidak diperlukan biaya bahan bakar seperti proses pembangkitan pada umumnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat kerva perbandingan total biaya pembangkitan pada gambar 4.8.



**Gambar 4.8** Diagram Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Tanpa dan Dengan Menggunakan ESS Pada *Study Case 2*

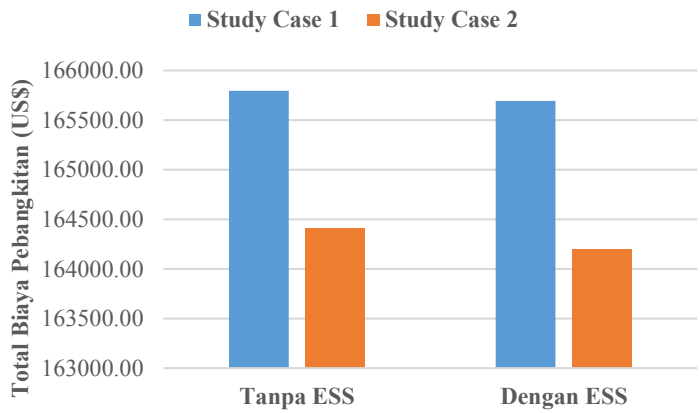
#### 4.5.3 Analisis Perbandingan Antara *Study Case 1* dan 2

Pada *study case 1*, total daya injeksi baik tanpa maupun dengan menggunakan ESS memiliki nilai lebih kecil dibandingkan pada *study case 2*. Hal ini dapat dilihat pada grafik berikut ini:



**Gambar 4.9** Diagram Perbandingan Total Daya Injeksi Antara *Study Case 1* dan *Study Case 2*

Sehingga pada *study case 1*, total biaya pembangkitan baik tanpa maupun dengan menggunakan ESS memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada *study case 2*. Hal ini dapat dilihat pada grafik dibawah ini:



**Gambar 4.10** Diagrams Perbandingan Total Biaya Pembangkitan Antara *Study Case 1* dan *Study Case 2*



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lastarda, Niko, *“Optimasi Power Flow Untuk Memaksimalkan Injeksi Daya Dari Sistem Pembangkit Tenaga Angin”*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS, Surabaya, 2013.
- [2] Penangsang, Ontoseno, *“Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik”*, ITS PRESS, Surabaya, 2012.
- [3] Momoh, James A, *“Electric Power System Application of Optimization”*, CRC Press, 2008.
- [4] Abdullah, Hamid, *“Dynamic Optimal Power Flow Menggunakan Sequential Quadratic Programming”*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS, Surabaya, 2013.
- [5] K.C. Divya, Jacob Ostergaard, *“Battery Energy Storage Technology For Power Systems”*, Electric Power Systems Research 79 (2009) 511–520, Elsevier, 2008.
- [6] Atwa, Moustafa, Yasser, *“Optimal Allocation of ESS in Distribution Systems With a High Penetration of Wind Energy”*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No.4, 2010.

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi dan analisis dapat diperoleh kesimpulan, sebagai berikut:

1. *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) dengan *Sequential Quadratic Programming* (SQP) dapat melakukan perhitungan pembangkitan dalam rentang waktu tertentu tanpa melanggar parameter *ramp rate* dari masing-masing unit pembangkit.
2. *Ramp rate* sangat berpengaruh terhadap daya yang dibangkitkan oleh setiap unit pembangkit karena daya yang dibangkitkan pada satu waktu akan mempengaruhi daya yang dibangkitkan pada waktu lain.
3. Biaya total pembangkitan dengan menggunakan *ramp rate* lebih mahal dibandingkan tanpa menggunakan *ramp rate*.
4. *Energy Storage System* (ESS) dapat menyimpan energi (*charging*) dan mengeluarkan energi yang tersimpan (*discharging*) pada saat beban puncak (*peak load*), Besar daya yang disimpan sama besar dengan daya yang dikeluarkan hal ini sesuai dengan rumus *energy balance* pada ESS.
5. Biaya total pembangkitan dengan menggunakan BESS lebih murah dibandingkan tanpa menggunakan BESS

#### **5.2 Saran**

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya pada bidang sistem operasi sistem tenaga berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada tugas akhir, antara lain:

1. *Plant* yang digunakan dapat dikembangkan dengan jumlah bus yang lebih besar dan kompleks.
2. Permasalahan dapat ditambahkan dengan memperhitungkan rugi-rugi saluran transmisi pada perhitungan *dynamic optimal power flow*.
3. Metode yang digunakan dapat diganti dengan metode lainnya, seperti *AI (Artificial Intelligent)*, *GA (Genetic Algorithm)*, dan lain-lain

*-- Halaman ini sengaja dikosongkan --*

## LAMPIRAN

Lampiran 1 Daya Rata-rata di Musim Semi

No	Jam ke -	P Injeksi PLTB (MW)
1	24 -- 1	7.8
2	1 -- 2	7.2
3	2 -- 3	7.3
4	3 -- 4	7.1
5	4 -- 5	6.9
6	5 -- 6	6.8
7	6 -- 7	6.5
8	7 -- 8	6
9	8 -- 9	5.2
10	9 -- 10	4.7
11	10 -- 11	4.2
12	11 -- 12	4.3
13	12 -- 13	4.9
14	13 -- 14	5.2
15	14 -- 15	5.6
16	15 -- 16	4.6
17	16 -- 17	4.7
18	17 -- 18	5.1
19	18 -- 19	5.2
20	19 -- 20	5.1
21	20 -- 21	5.6
22	21 -- 22	6
23	22 -- 23	6.2
24	23 -- 24	3.2

## Lampiran 2 Standar Data IEEE 14 Bus

Bus	Type	Daya Beban		Voltage		Base kV	Vmax	Vmin
		Pd (MW)	Qd (MW)	Magnitude	Angle			
1	3	0	0	1.06	0	69	1.06	0.94
2	2	21.7	12.7	1.045	-4.98	69	1.06	0.94
3	2	94.2	19	1.01	-12.72	69	1.06	0.94
4	1	47.8	-3.9	1.019	-10.33	69	1.06	0.94
5	1	7.6	1.6	1.02	-8.78	69	1.06	0.94
6	2	11.2	7.5	1.07	-14.22	13.8	1.06	0.94
7	1	0	0	1.062	-13.37	13.8	1.06	0.94
8	2	0	0	1.09	-13.36	18	1.06	0.94
9	1	29.5	16.6	1.056	-14.94	13.8	1.06	0.94
10	1	9	5.8	1.51	-15.1	13.8	1.06	0.94
11	2	3.5	1.8	1.057	-14.79	13.8	1.06	0.94
12	1	7.1	1.6	1.055	-15.07	13.8	1.06	0.94
13	1	13.5	5.8	1.05	-15.16	13.8	1.06	0.94
14	1	14.9	5	1.036	-16.04	13.8	1.06	0.94

Bus	Pg (MW)	Qg (MW)	Qmax	Qmin	Vg	MVAbase	Pmax	Pmin
1	232.4	-16.9	10	0	1.06	100	232.4	0
2	40	42.4	50	-40	1.045	100	140	0
3	0	23.4	40	0	1.01	100	100	0
6	0	12.2	24	-6	1.07	100	100	0
8	0	17.4	24	-6	1.09	100	100	0
11	31.2	0	0	0	1.00	100	50	0

From Bus	To Bus	Resistance	Reactance	Line Charging	Tab Ratio
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	0
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	0
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	0
2	4	0.05811	0.17632	0.034	0
2	5	0.05695	0.17388	0.0346	0
3	4	0.06701	0.17103	0.0128	0
4	5	0.01335	0.04211	0	0
4	7	0	0.209	0	0.978
4	9	0	0.556	0	0.969
5	6	0	0.252	0	0.932
6	11	0.09498	0.1989	0	0
6	12	0.12291	0.25581	0	0
6	13	0.06615	0.13027	0	0
7	8	0	0.176	0	0
7	9	0	0.11	0	0
9	10	0.03181	0.0845	0	0
9	14	0.12711	0.27038	0	0
10	11	0.08205	0.19207	0	0
12	13	0.22092	0.19988	0	0
13	14	0.17093	0.34802	0	0

Lampiran 3 Branch Flow Tanpa Menggunakan ESS Study Case 1

		JAM 1						JAM 2						JAM 3						JAM 4						JAM 5						JAM 6					
		From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+Q)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+Q)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+Q)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+Q)		
From Bus	To Bus	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)				
1	2	126.250	-1.110	-123.470	13.690	2.760	8.830	119.090	-10.420	-116.630	12.070	2.456	7.500	119.070	-10.410	-116.620	12.060	2.455	7.500	111.120	-9.880	-108.980	10.960	2.138	6.530	103.260	-9.310	-101.420	9.990	1.846	5.640	108.040	-9.770	-106.020	10.040	2.021	6.170
1	3	26.420	16.110	-26.700	-8.230	1.721	7.190	24.590	9.420	-25.490	-8.420	1.522	6.240	24.570	9.420	-25.380	-8.420	1.521	6.240	24.510	9.890	-24.980	-8.770	1.321	5.460	17.340	8.490	-17.320	-9.990	1.134	4.790	26.520	8.720	-26.390	-8.890	1.240	5.140
1	4	62.990	0.640	-61.290	1.970	1.711	7.270	59.890	0.470	-58.730	1.700	1.548	6.520	59.870	0.470	-58.710	1.700	1.547	6.520	55.970	1.220	-54.610	-0.190	1.357	5.700	52.160	1.350	-50.990	-1.080	1.174	4.990	54.440	-1.490	-53.160	-0.740	1.290	5.390
2	4	44.210	6.680	-41.110	-6.970	-1.082	3.280	41.530	6.190	-40.580	-6.890	0.953	2.890	41.520	6.190	-40.570	-6.890	0.953	2.890	38.660	6.090	-37.830	-7.180	0.828	2.510	35.810	6.100	-35.090	-7.540	0.714	2.170	37.560	6.160	-36.780	-7.390	0.784	2.380
2	3	31.700	8.860	-31.150	-10.720	0.585	1.790	29.660	8.370	-29.140	-10.460	0.514	1.570	29.650	8.370	-29.140	-10.460	0.514	1.570	27.530	8.170	-27.000	-10.480	0.444	1.370	25.440	8.090	-25.000	-10.590	0.388	1.190	26.730	8.190	-26.310	-10.570	0.425	1.300
3	4	-22.220	14.280	22.600	-14.410	0.465	1.190	-21.740	13.470	22.170	-13.680	0.434	1.110	-21.740	13.470	22.180	-13.680	0.434	1.110	-20.750	11.840	21.120	-12.190	0.379	0.970	-19.660	11.020	20.000	-11.490	0.337	0.860	-20.310	11.340	20.670	-11.740	0.339	0.920
3	5	-52.050	11.160	52.260	-9.990	0.773	1.180	-49.480	10.830	49.770	-9.770	0.733	1.060	-49.460	10.830	49.770	-9.770	0.733	1.060	-46.980	10.080	46.680	-9.160	0.294	0.930	-43.320	9.410	43.580	-8.410	0.255	0.800	-45.160	9.740	45.460	-8.870	0.278	0.880
4	3	18.720	1.710	-18.720	-1.020	0.080	0.710	17.240	1.480	-17.240	-0.820	0.000	0.590	17.240	1.480	-17.230	-0.820	0.000	0.590	15.770	1.110	-15.770	-0.630	0.000	0.490	14.320	1.430	-14.320	-1.030	0.000	0.400	15.210	1.220	-15.210	-0.740	0.000	0.410
4	5	10.790	4.500	-10.790	-3.300	0.000	0.700	9.910	4.330	-9.910	-3.730	0.000	0.600	9.920	4.330	-9.920	-3.730	0.000	0.600	9.080	4.170	-9.080	-3.660	0.000	0.510	8.250	4.190	-8.250	-3.760	0.000	0.430	8.770	4.170	-8.770	-3.690	0.000	0.400
5	6	28.550	23.990	-28.550	-21.010	0.000	2.980	26.350	23.650	-26.350	-20.970	0.000	2.680	26.340	23.650	-26.340	-20.970	0.000	2.680	24.110	23.370	-24.110	-20.970	0.000	2.400	21.960	23.290	-21.960	-21.120	0.000	2.170	23.320	23.340	-23.320	-21.020	0.000	2.310
6	11	-5.960	9.720	6.070	-9.470	0.114	0.240	-6.290	9.740	6.400	-9.490	0.120	0.250	-6.300	9.740	6.420	-9.490	0.120	0.250	-6.680	9.770	6.780	-9.510	0.124	0.260	-6.950	9.990	7.080	-9.630	0.129	0.270	-6.710	9.820	6.830	-9.560	0.125	0.260
6	12	7.280	10.990	-7.090	-10.040	0.199	0.410	6.870	10.880	-6.680	-10.490	0.191	0.400	6.870	10.880	-6.680	-10.490	0.191	0.400	6.460	10.870	-6.280	-10.490	0.183	0.380	6.060	10.880	-5.880	-10.510	0.177	0.370	6.300	10.870	-6.120	-10.500	0.181	0.380
6	13	17.140	18.390	-16.740	-17.620	0.384	0.780	16.250	18.350	-15.870	-17.620	0.372	0.770	16.250	18.350	-15.870	-17.620	0.372	0.770	15.530	18.330	-14.990	-17.630	0.352	0.690	14.460	18.350	-14.120	-17.690	0.335	0.660	14.990	18.330	-14.640	-17.650	0.345	0.680
7	8	6.000	-15.990	-6.000	16.000	0.040	0.000	-5.960	16.000	6.000	-16.000	0.000	0.000	-5.960	16.000	6.000	-16.000	0.000	0.000	-5.960	16.000	6.000	-16.000	0.000	0.000	-5.960	16.000	6.000	-16.000	0.000	0.000	-5.960	16.000	6.000	-16.000	0.000	0.000
7	9	18.720	9.610	-18.720	-9.910	0.000	0.460	17.240	9.410	-17.240	-9.010	0.000	0.400	17.240	9.410	-17.240	-9.010	0.000	0.400	15.770	9.220	-15.770	-8.880	0.000	0.340	14.320	8.770	-14.320	-8.480	0.000	0.290	15.230	9.690	-15.230	-8.770	0.000	0.330
9	10	-5.500	12.030	5.560	-11.880	0.054	0.140	-5.830	12.010	5.890	-11.860	0.054	0.140	-5.840	12.010	5.890	-11.860	0.054	0.140	-6.160	11.970	6.210	-11.830	0.055	0.150	-6.450	11.850	6.500	-11.770	0.055	0.150	-6.220	11.920	6.270	-11.780	0.055	0.150
9	14	8.440	11.580	-8.190	-11.040	0.252	0.540	7.920	11.530	-7.680	-11.020	0.239	0.510	7.920	11.530	-7.680	-11.020	0.239	0.510	7.410	11.480	-7.190	-11.010	0.224	0.480	6.890	11.370	-6.680	-10.920	0.214	0.450	7.210	11.430	-6.990	-10.960	0.221	0.470
10	11	-13.660	1.880	13.810	-1.530	0.153	0.360	-13.530	1.860	13.680	-1.510	0.149	0.350	-13.540	1.860	13.690	-1.510	0.150	0.350	-13.410	1.830	13.560	-1.490	0.146	0.340	-13.250	1.770	13.390	-1.370	0.141	0.330	-13.290	1.780	13.440	-1.440	0.143	0.330
12	13	0.690	-1.520	-0.690	1.520	0.006	0.010	0.680	-1.510	-0.640	1.520	0.006	0.010	0.650	-1.510	-0.640	1.520	0.006	0.010	0.600	-1.510	-0.600	1.510	0.006	0.010	0.560	-1.490	-0.560	1.500	0.006	0.010	0.580	-1.500	-0.580	1.510	0.006	0.010
13	14	5.280	3.090	-5.220	-3.960	0.053	0.110	5.040	3.100	-4.980	-3.980	0.000	0.750	5.040	3.100	-4.980	-3.980	0.000	0.750	4.790	3.120	-4.730	0.000	0.000	4.550	3.190	-4.500	0.000	0.000	4.260	3.180	-4.240	-3.040	0.000	0.110		
		Total		9.860		38.890		Total		8.952		34.118		Total		8.951		34.100		Total		7.987		30.018		Total		6.961		26.298		Total		7.524		28.538	

		JAM 7						JAM 8						JAM 9						JAM 10						JAM 11						JAM 12					
		From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+Q)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+Q)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+Q)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+Q)		
From Bus	To Bus	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)				
1	2	95.540	8.100	-99.960	7.060	1.579	4.820	111.410	-9.880	-109.260	10.590	2.149	6.560	112.340	-9.890	-110.150	10.710	2.185	6.670	121.370	-10.750	-118.820	12.690	2.551	7.790	134.480	-10.190	-112.210	11.270	2.269	6.930	114.260	-10.160	-112.000	11.210	2.261	6.900
1	3	43.640	8.200	-42.670	8.890	0.973	4.020	51.300	8.880	-49.970	-8.680	1.331	5.490	51.320	8.890	-50.560	-8.560	1.362	5.620	56.400	9.750	-54.880	-8.400	1.405	6.630	53.410	9.190	-51.870	-8.270	1.435	5.920	53.170	9.160	-51.740	-8.580	1.428	5.890
2	3	48.420	1.120	-47.410	-1.550	0.111	4.260	36.660	0.940	-35.710	0.106	1.356	5.710	36.360	0.280	-34.990	0.810	1.369	5.770	60.480	0.530	-58.910	1.470	1.580	6.650	56.930	0.320	-55.530	0.890	1.397	5.890	56.870	0.320	-55.480	0.880	1.394	5.880
2	4	33.010	5.970	-32.440	-7.740	0.610	1.850	38.600	6.020	-37.970	-7.690	0.834	2.530	39.280	5.870	-38.420	-6.880	0.852	2.590	42.730	6.450	-41.720	-6.970	1.009	3.060	40.400	6.480	-39.490	-6.960	0.902	2.740	40.280	6.070	-39.390	-6.950	0.887	2.720
2	5	18.720	1.710	-18.720	-1.020	0.080	0.710	17.240	1.480	-17.240	-0.820	0.000	0.590	17.240	1.480	-17.230	-0.820	0.000	0.590	15.770	1.110	-15.770	-0.630	0.000	0.490	14.320	1.430	-14.320	-1.030	0.000	0.400	15.210	1.220	-15.210	-0.740	0.000	0.410
2	9	23.990	7.900	-23.050	-10.570	0.334	0.020	22.670	8.130	-22.720	-10.420	0.451	0.380	23.120	8.080	-22.650	-10.290	0.463	0.410	30.760	8.630	-30.220	-10.600	0.522	1.690	29.160	8.280	-28.870	-10.420	0.497	1.520	29.600	8.250				

Lampiran 4 Branch Flow Dengan Menggunakan ESS Study Case 1

		JAM 1						JAM 2						JAM 3						JAM 4						JAM 5						JAM 6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
		From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+2*Z)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+2*Z)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+2*Z)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+2*Z)			From Bus Injection			To Bus Injection			Loss (P+2*Z)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
From Bus	To Bus	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR



Lampiran 5 Branch Flow Tanpa Menggunakan ESS Study Case 2

From Bus		To Bus		JAM 1										JAM 2										JAM 3										JAM 4										JAM 5										JAM 6									
				From Bus Injection					To Bus Injection					Loss (P+2+Z)					From Bus Injection					To Bus Injection					Loss (P+2+Z)					From Bus Injection					To Bus Injection					Loss (P+2+Z)					From Bus Injection					To Bus Injection					Loss (P+2+Z)				
				P (MW)	Q (MVAR)	F (MW)	G (MVAR)	L (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	F (MW)	G (MVAR)	L (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	F (MW)	G (MVAR)	L (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	F (MW)	G (MVAR)	L (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	F (MW)	G (MVAR)	L (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	F (MW)	G (MVAR)	L (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	F (MW)	G (MVAR)	L (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	F (MW)	G (MVAR)	L (MW)																				
1	2	122.740	-10.530	-120.130	12.650	2.608	7.960	116.040	-10.000	-113.700	11.270	2.331	7.120	115.820	-9.970	-113.500	11.210	2.322	7.090	108.360	-9.600	-106.320	9.950	2.031	6.210	100.910	-9.870	-99.140	8.490	1.762	5.380	105.830	-9.430	-103.890	9.500	1.939	5.920																										
1	3	55.910	9.540	-54.340	-8.910	1.576	6.511	52.940	9.010	-51.530	-8.860	1.415	5.940	52.810	8.980	-51.400	-8.860	1.407	5.810	49.290	8.670	-48.060	-8.480	1.231	5.080	45.780	8.290	-44.720	-8.290	1.067	4.400	48.910	8.550	-47.100	-8.590	1.178	4.860																										
1	4	62.580	9.560	-60.890	-9.310	1.692	7.130	59.070	9.380	-57.570	-9.200	1.505	6.640	59.010	9.380	-57.510	-9.260	1.502	6.630	55.220	1.510	-53.900	-0.630	-1.317	53.550	51.550	1.290	-50.400	-1.140	1.146	44.000	53.870	1.430	-52.620	-0.830	1.253	52.360																										
2	4	21.660	2.160	-21.660	-2.160	0.000	0.000	21.660	2.160	-21.660	-2.160	0.000	0.000	21.660	2.160	-21.660	-2.160	0.000	0.000	21.660	2.160	-21.660	-2.160	0.000	0.000	21.660	2.160	-21.660	-2.160	0.000	0.000	21.660	2.160	-21.660	-2.160	0.000	0.000	21.660	2.160	-21.660	-2.160	0.000	0.000																				
2	5	29.670	8.390	-29.160	-9.080	0.515	1.570	28.160	8.060	-27.700	-10.310	0.465	1.420	28.060	8.040	-27.600	-10.300	0.462	1.410	26.180	8.110	-25.770	-10.480	0.393	1.000	25.270	7.990	-23.910	-10.580	0.357	0.990	25.640	8.080	-25.250	-10.660	0.394	1.200																										
3	4	-23.890	1.310	24.400	-1.410	0.511	1.310	-22.500	13.280	22.960	-13.440	0.452	1.150	-22.560	13.270	23.010	-13.430	0.454	1.160	-21.460	11.520	21.850	-11.840	0.393	1.000	-20.250	11.000	20.600	-11.430	0.351	0.900	-20.860	11.310	21.230	-11.680	0.373	0.950																										
4	5	-51.840	11.020	52.210	-9.860	0.368	1.160	-48.980	10.760	49.310	-9.660	0.328	1.030	-48.950	10.690	49.280	-9.660	0.328	1.030	-46.000	9.750	46.280	-8.830	0.287	0.910	-42.980	9.240	43.320	-8.450	0.250	0.790	-44.860	9.580	45.130	-8.720	0.273	0.860																										
5	6	16.240	1.530	-16.240	-1.010	0.000	0.510	15.510	1.290	-15.510	-0.810	0.000	0.470	15.390	1.280	-15.590	-0.860	0.000	0.390	12.960	1.580	-12.960	-1.250	0.000	0.330	11.960	1.530	-11.960	-0.970	0.000	0.330	11.960	1.530	-11.960	-0.970	0.000	0.330																										
6	7	9.930	4.400	-9.930	-3.350	0.000	0.550	8.930	4.270	-8.930	-3.370	0.000	0.500	8.860	4.260	-8.860	-3.370	0.000	0.490	8.170	4.190	-8.170	-3.760	0.000	0.430	7.840	4.190	-7.840	-3.760	0.000	0.430	7.840	4.190	-7.840	-3.760	0.000	0.430																										
6	8	24.450	-23.650	-24.450	-21.100	0.000	2.470	23.450	-23.430	-23.450	-21.090	0.000	2.340	23.250	-23.420	-23.250	-21.100	0.000	2.320	21.470	-23.280	-21.470	-21.150	0.000	2.130	19.730	-23.230	-19.700	-21.270	0.000	1.960	21.200	-23.270	-21.200	-21.170	0.000	2.100																										
6	11	-10.260	9.950	10.440	-9.560	0.182	0.380	-9.320	9.890	9.490	-9.550	0.164	0.340	-9.530	9.900	9.700	-9.550	0.168	0.350	-9.490	9.960	-9.610	0.164	0.350	-9.330	10.050	9.490	-9.700	0.163	0.350	-8.930	9.960	-9.000	-9.630	0.158	0.330																											
6	12	7.320	10.880	-7.120	-10.470	0.198	0.410	6.900	10.870	-6.710	-10.470	0.194	0.400	6.900	10.870	-6.710	-10.470	0.194	0.400	6.940	10.870	-6.310	-10.490	0.183	0.380	6.080	10.870	-5.900	-10.500	0.177	0.370	6.320	10.870	-6.140	-10.490	0.180	0.380																										
6	13	17.300	18.350	-16.910	-17.580	0.387	0.780	16.360	18.330	-15.980	-17.590	0.373	0.730	16.360	18.320	-15.990	-17.590	0.373	0.730	15.450	18.320	-15.110	-17.630	0.353	0.700	14.550	18.340	-14.210	-17.630	0.330	0.660	15.070	18.330	-14.730	-17.650	0.346	0.680																										
7	8	18.240	-1.530	-18.240	-1.010	0.000	0.510	18.240	1.290	-18.510	-0.810	0.000	0.470	18.300	1.280	-18.590	-0.860	0.000	0.390	12.960	1.580	-12.960	-1.250	0.000	0.330	12.000	1.530	-12.000	-1.250	0.000	0.330	12.000	1.530	-12.000	-1.250	0.000	0.330																										
7	9	32.580	9.610	-32.240	-9.240	0.000	0.370	31.580	9.410	-31.520	-9.270	0.000	0.340	31.400	9.410	-31.500	-9.270	0.000	0.340	14.180	9.120	-14.180	-8.830	0.000	0.290	13.000	8.830	-13.000	-8.830	0.000	0.290	13.000	8.830	-13.000	-8.830	0.000	0.290																										
9	10	-9.190	12.200	9.260	-12.010	0.071	0.190	-8.410	12.120	8.480	-11.940	0.066	0.180	-8.590	12.130	8.660	-11.950	0.067	0.180	-8.530	12.040	8.600	-11.860	0.066	0.180	-8.480	11.900	8.540	-11.730	0.065	0.170	-8.110	11.970	8.180	-11.900	0.063	0.170																										
9	14	8.240	11.630	-7.990	-11.100	0.249	0.530	7.740	11.570	-7.540	-11.070	0.237	0.500	7.780	11.570	-7.540	-11.070	0.234	0.500	7.880	11.490	-7.760	-11.010	0.224	0.480	6.780	11.380	-6.570	-10.930	0.212	0.440	7.100	11.440	-6.880	-10.970	0.219	0.470																										
10	11	-17.360	2.010	17.610	-1.440	0.245	0.570	-16.130	1.940	16.340	-1.450	0.210	0.490	-16.310	1.950	16.520	-1.450	0.215	0.500	-15.800	1.860	16.000	-1.390	0.201	0.470	-15.290	1.730	15.480	-1.387	0.440	-15.200	1.830	-15.380	-1.370	0.186	0.430																											
12	13	0.730	-1.530	-0.730	1.540	0.006	0.010	0.680	-1.530	-0.670	1.536	0.006	0.010	0.680	-1.530	-0.670	1.536	0.006	0.010	0.630	-1.510	-0.620	1.520	0.006	0.010	0.580	-1.480	-0.600	1.510	0.006	0.010	0.660	-1.510	-0.600	1.510	0.006	0.010																										
13	14	5.490	3.040	-5.420	-2.900	0.007	0.140	5.180	3.060	-5.120	-2.930	0.007	0.130	5.190	3.060	-5.130	-2.930	0.007	0.140	4.920	3.110	-4.860	-2.990	0.007	0.130	4.660	3.180	-4.610	-3.070	0.054	0.120	4.800	3.140	-4.740	-3.030	0.064	0.130																										
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35.940		Total		8.685		32.410		Total		8.668		32.300		Total		7.997		28.630		Total		7.997		28.630		Total		6.801		25.220		Total		7.361		27.440																					
		Total		9.667		35																																																									

Lampiran 6 Branch Flow Dengan Menggunakan ESS Study Case 2

From Bus	To Bus	JAM 1				JAM 2				JAM 3				JAM 4				JAM 5				JAM 6					
		From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (P+2+Z)		From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (P+2+Z)		From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (P+2+Z)		From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (P+2+Z)			
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)				
1	2	126.390	-11.220	-123.620	13.830	2.767	8.480	121.370	-10.750	-118.820	12.600	2.551	7.790	121.160	-10.720	-118.610	12.630	2.542	7.760	113.620	-10.660	-111.390	11.040	2.235	6.820		
1	3	28.750	-10.220	-27.010	12.710	1.740	5.790	26.480	-9.720	-24.890	8.480	1.405	4.610	28.270	-9.400	-26.590	9.970	2.513	8.560	1.405	4.610	49.240	-8.770	-46.080	8.950		
1	4	62.530	0.610	-60.840	1.360	1.690	7.120	60.480	0.530	-58.890	1.470	1.590	6.650	60.430	0.520	-58.850	1.460	1.577	6.640	59.800	0.500	-57.710	0.990	1.209	5.990		
2	4	44.570	-6.790	-43.450	-7.030	1.098	3.330	42.730	-6.450	-41.720	-6.970	1.099	3.060	42.610	-6.420	-41.610	-6.960	1.004	3.350	39.950	-6.000	-39.070	-6.920	0.882	2.680		
2	5	10.750	8.970	-10.470	-9.090	0.599	1.830	30.780	8.630	-30.220	-10.600	0.552	1.600	30.670	8.610	-30.120	-10.590	0.549	1.670	28.740	8.180	-28.260	-10.730	0.484	1.480		
3	4	-21.430	14.230	21.870	-14.410	0.441	1.130	-20.160	13.650	21.590	-13.890	0.422	1.080	-21.220	13.630	21.640	-13.870	0.423	1.080	-20.050	12.750	20.420	-13.120	0.373	0.960		
3	5	-51.820	11.160	52.160	-9.990	0.770	1.170	-49.710	10.940	50.650	-9.870	0.740	1.070	-49.680	10.930	50.620	-9.860	0.739	1.070	-46.710	10.580	47.010	-9.630	0.299	0.940		
4	5	19.290	1.760	-19.290	-1.020	0.000	0.710	18.530	1.520	-18.530	-0.850	0.000	0.640	18.410	1.510	-18.410	-0.840	0.000	0.580	17.210	1.230	-17.210	-0.650	0.000	0.580		
4	6	11.100	4.530	-11.100	-3.790	0.000	0.740	10.670	4.400	-10.670	-3.710	0.000	0.680	10.680	4.390	-10.680	-3.710	0.000	0.680	9.910	4.240	-9.910	-3.640	0.000	0.590		
5	6	29.450	24.090	-29.450	-20.980	0.000	3.110	28.510	23.870	-28.510	-20.910	0.000	2.960	28.310	23.850	-28.310	-20.920	0.000	2.930	26.520	23.550	-26.520	-20.870	0.000	2.680		
6	11	-5.000	9.680	5.100	-9.450	0.106	0.220	-4.020	9.650	4.120	-9.440	0.097	0.200	-4.230	9.650	4.310	-9.450	0.099	0.210	-4.140	9.650	4.420	-9.460	0.098	0.200		
6	12	7.270	1.990	-7.070	-1.090	0.199	0.410	6.850	1.090	-6.660	-1.049	0.191	0.400	6.860	1.090	-6.670	-1.049	0.191	0.400	6.440	1.080	-6.260	-1.050	0.183	0.380		
6	13	17.100	18.400	-16.760	-17.620	0.384	0.780	16.160	18.370	-15.790	-17.640	0.372	0.730	16.170	18.370	-15.800	-17.640	0.372	0.730	15.250	18.340	-14.900	-17.650	0.351	0.690		
9	10	-4.660	12.000	4.710	-11.860	0.051	0.140	-3.900	11.950	3.990	-11.820	0.048	0.130	-4.010	11.950	4.060	-11.790	0.048	0.130	-3.950	11.820	4.000	-11.700	0.047	0.130		
9	14	8.500	11.560	-8.820	-11.020	0.253	0.540	8.030	11.500	-7.790	-10.990	0.241	0.510	8.020	11.500	-7.730	-10.970	0.228	0.490	7.030	11.160	-6.820	-10.990	0.216	0.460		
10	11	-12.810	1.860	12.950	-1.550	0.135	0.320	-11.600	1.820	11.710	-1.560	0.111	0.260	-11.780	1.820	11.890	-1.530	0.114	0.270	-11.260	1.790	11.360	-1.550	0.104	0.240		
12	13	0.680	-1.510	-0.680	1.520	0.006	0.010	0.630	-1.510	-0.630	1.510	0.006	0.010	0.680	-1.510	-0.680	1.510	0.006	0.010	0.530	-1.490	-0.530	1.480	0.005	0.000		
13	14	5.230	3.110	-5.170	-3.980	0.061	0.130	4.940	3.130	-4.880	-3.010	0.059	0.120	4.950	3.130	-4.890	-3.010	0.059	0.120	4.670	3.140	-4.620	-3.030	0.058	0.110		
		Total		9914		38.220		Total		9184		35.580		Total		9161		35.370		Total		8138		31.420		Total	
From Bus	To Bus	JAM 7				JAM 8				JAM 9				JAM 10				JAM 11				JAM 12					
		From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (P+2+Z)		From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (P+2+Z)		From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (P+2+Z)		From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (P+2+Z)			
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)				
1	2	99.180	-8.450	-97.480	7.790	1.702	5.200	115.930	-10.410	-113.610	11.670	2.328	7.110	110.310	-9.850	-108.200	10.430	2.107	6.430	119.160	-10.430	-116.700	12.090	2.459	7.510		
1	3	46.020	8.580	-44.940	-9.380	1.080	4.460	54.270	9.410	-52.780	-8.550	1.487	6.140	50.880	8.860	-49.280	-8.810	1.295	5.350	54.970	9.430	-53.450	-8.420	1.525	6.290		
1	4	34.920	6.100	-34.240	-7.650	0.681	2.070	41.180	6.270	-40.250	-7.620	0.938	2.850	38.240	6.160	-37.430	-7.300	0.812	2.460	41.570	6.200	-40.610	-6.890	0.955	2.290		
2	4	-17.630	10.580	17.910	-11.150	0.280	0.720	-18.440	12.960	19.800	-13.350	0.363	0.950	-20.970	11.540	21.250	-11.280	0.380	0.970	-21.720	11.480	22.150	-11.690	0.434	1.110		
4	5	-40.080	9.110	41.030	-8.400	0.226	0.710	-47.020	10.680	47.330	-9.730	0.304	0.960	-46.280	9.900	46.570	-9.800	0.292	0.920	-49.020	10.830	49.470	-9.780	0.335	1.060		
4	6	15.020	1.500	-15.020	-1.060	0.000	0.440	18.550	1.370	-18.550	-0.700	0.000	0.460	17.290	1.410	-17.290	-0.820	0.000	0.590	16.520	1.170	-16.520	-0.630	0.000	0.590		
4	9	8.650	4.180	-8.650	-3.710	0.000	0.470	10.680	4.310	-10.680	-3.640	0.000	0.630	8.510	4.160	-8.510	-3.680	0.000	0.480	9.950	4.330	-9.950	-3.370	0.000	0.600		
5	6	23.380	23.370	-23.380	-23.050	0.000	2.510	28.760	23.810	-28.760	-20.830	0.000	2.980	23.340	23.330	-23.340	-21.020	0.000	2.320	26.420	23.660	-26.420	-20.990	0.000	2.690		
6	11	4.000	-15.590	4.000	16.000	0.000	0.410	3.900	-15.590	4.000	16.000	0.000	0.400	4.000	-15.600	4.000	16.000	0.000	0.400	4.000	-15.600	4.000	16.000	0.000	0.400		
6	12	5.620	10.800	-5.450	-10.510	0.171	0.360	6.240	10.890	-6.240	-10.510	0.183	0.380	6.470	10.870	-6.260	-10.490	0.183	0.380	6.870	10.880	-6.680	-10.490	0.191	0.400		
6	13	13.420	18.370	-13.110	-17.740	0.318	0.630	15.170	18.360	-14.820	-17.670	0.351	0.690	15.380	18.320	-15.030	-17.630	0.353	0.690	16.240	18.350	-15.870	-17.620	0.372	0.730		
7	8	0.000	-1.440	0.000	1.430	0.000	0.340	0.000	-1.560	0.000	1.600	0.000	0.400	0.000	-1.530	0.000	1.590	0.000	0.400	0.000	-1.600	0.000	1.600	0.000	0.400		
7	9	15.020	8.540	-15.020	-8.240	0.000	0.310	18.550	9.290	-18.550	-8.850	0.000	0.450	15.110	9.200	-15.110	-8.870	0.000	0.330	17.290	9.410	-17.290	-9.010	0.000	0.400		
7	10	-3.510	-11.710	3.570	-11.990	0.045	0.120	-2.050	-11.800	2.050	-11.760	0.044	0.120	-2.650	-11.990	2.650	-11.840	0.058	0.150	-2.760	-12.000	2.820	-11.860	0.054	0.140		
9	14	6.550	11.260	-6.460	-10.830	0.236	0.440	7.640	11.430	-7.410	-10.840	0.236	0.480	7.750	11.480	-7.750	-11.020	0.239	0.510	7.470	11.470	-7.240	-10.990	0.227	0.480		
10	11	-9.870	1.590	9.950	-1.400	0.079	0.190	-9.250	1.760	9.330	-1.600	0.077	0.170	-14.110	1.840	14.270	-1.460	0.161	0.380	-13.470	1.860	13.620	-1.450	0.148	0.350		
12	13	0.680	-1.470	-0.670	1.470	0.006	0.010	0.660	-1.460	-0.660	1.460	0.006	0.010	0.660	-1.460	-0.660	1.460	0.006	0.010	0.590	-1.450	-0.590	1.450	0.006	0.010		
13	14	4.430	2.770	-4.480	-3.710	0.047	0.100	4.570	3.710	-4.510	-3.060	0.045	0.100	4.580	3.710	-4.570	-3.060	0.045	0.100	4.300	3.730	-4.350	-3.060	0.045	0.100		
		Total		6366		24.640		Total		6366		24.640		Total		6366		24.640		Total		6366		24.640		Total	
From Bus	To Bus	JAM 13				JAM 14				JAM 15				JAM 16				JAM 17				JAM 18					

## BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Masluchi Aidil Fais. Penulis lahir di Sidoarjo tanggal 15 April 1992 dan dibesarkan di desa Sambibulu. Penulis adalah anak ketujuh dari tujuh saudara. Setelah enam tahun menempuh pendidikan dasar di MI Hasyim Asy'ari Bangsri Sukodono – Sidoarjo, Fais melanjutkan pendidikan ke MTs Persatuan Islam 69 Matraman – Jakarta pada tahun 2004. Mulai tahun 2007, penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 22 Jakarta dan lulus pada tahun 2010. Pada tahun yang sama, penulis masuk ke Jurusan D3 Teknik Elektro Industri Kerjasama Disnakertransduk, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Pada tahun 2013, penulis lulus dan diwisuda dengan gelar Ahli Madya (A.Md). Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan S1 Teknik Elektro Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Di semester kedua, penulis mulai mendalami Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email *fais13@mhs.ee.its.ac.id*.